

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali

*Interazione tra debris flow e vegetazione arborea ed arbustiva:
caso studio nell'alta valle del torrente Ansiei (loc. Cosderuoibe, Belluno)*

Relatore:

Prof. Vincenzo D'Agostino

Correlatore:

Dott.ssa Tamara Michellini

Laureando:

Luca Romanel

Matricola n.

1055893

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

Alla mia famiglia e a Ilaria

RIASSUNTO

Le colate detritiche sono fenomeni di trasporto solido ad elevata concentrazione di sedimenti, materiale vegetale, acqua ed aria, dotati di un notevole potere distruttivo. Si sviluppano come un'ondata di piena, che si propaga verso valle con velocità che possono raggiungere anche qualche decina di metri al secondo e si arrestano nel conoide. Tali conoidi sono maggiormente interessati da rapidi cambiamenti morfologici in occasione degli eventi alluvionali e, quindi, sono caratterizzati dai maggiori livelli di pericolosità associata ad una maggiore densità di strutture antropiche. A difesa di esse, gli ecosistemi forestali svolgono un ruolo importante nel prevenire e mitigare i pericoli naturali e quindi, nella salvaguardia degli insediamenti umani, nella difesa del territorio agro-silvo-pastorale e più in generale nella conservazione dell'ambiente.

L'obiettivo della presente tesi è stato quello di analizzare gli effetti tra la vegetazione, arborea ed arbustiva e il suo comportamento durante le fasi trasporto e deposizione delle colate detritiche analizzando un evento reale innescatosi il 30 luglio 2012 su un piccolo bacino affluente in destra idrografica del Torrente Ansiei in provincia di Belluno.

Inoltre, mediante l'impiego dei modelli numerici FLO-2D e RIVERFLO-2D si è stato simulato l'effetto "benefico" svolto dal bosco nel limitare la pericolosità dei fenomeni quali *debris flow* nei confronti delle infrastrutture antropiche maggiormente sensibili.

In seguito ai rilievi in campo eseguiti nelle estati 2013 e 2014 è stato possibile così determinare il volume totale depositatosi in conoide a seguito dell'evento, ammontante a circa 15'000 m³; in un secondo momento, grazie all'analisi granulometrica eseguita campionando in suddetto deposito si è potuto determinare la "reologia" della colata detritica avvenuta, rientrando, secondo la classificazione di Moscariello et al. (2001) nelle cosiddette "*colate detritiche dolomitiche*", confermando dunque i risultati emersi dall'analisi geologica.

È stato calcolato il volume anche mediante l'approccio idrologico-volumetrico partendo dall'idrogramma liquido, ottenuto con il modello K.L.E.M. incluso nel software Adb-ToolBox e calcolando il conseguente debrisgramma della colata utilizzando il metodo proposto da D'Agostino e Marchi (2004); tale metodo ha permesso così di calcolare un volume molto simile con quanto rilevato in campo.

Dai rilievi svolti sulla componente vegetale, distinta in "arborea" e "arbustiva" così da considerare la diversa natura e portamento delle specie, è emersa sia la correlazione proporzionale tra il diametro degli individui e lo spessore di sedimenti trattenuti a monte, che la relazione decrescente tra la mortalità e il diametro degli individui rilevati

confermando quanto già rilevato e stabilito da Ishikawa et al. (2003) e Mizuyama et al. (1988) in seguito ai loro studi condotti per *debris flow* verificati in Giappone.

Dopo un'accurata calibrazione dei modelli FLO-2D e RIVERFLO-2D, si è cercato di simulare l'effetto "benefico" svolto dalla componente forestale nel limitare la pericolosità del fenomeno provocandone riduzione della distanza di arresto, velocità ed energia e contenendo la possibile "area di inondazione".

Dalle simulazioni condotte sono stati ottenuti, in seguito all'inserimento della componente vegetale, risultati relativi a *run-out*, volume e area nettamente inferiori rispetto alle simulazioni "senza vegetazione".

Nello specifico, il modello FLO-2D, grazie ad una maggiore precisione nella definizione dei parametri reologici in input ha fornito valori molto accurati e quasi identici con quanto rilevato nella realtà.

È quindi possibile, nelle aree caratterizzate da un basso impatto antropico, prevedere gli interventi di protezione seguendo la via cosiddetta *naturalistica*, scegliendo e gestendo accuratamente la componente forestale in modo da garantire la funzione di protezione nel modo più efficiente possibile; sarebbe comunque opportuno associare tale protezione agli interventi di mitigazione di tipo antropico, in modo così da limitare l'impatto ambientale, la quantità di materiali impiegati e soprattutto l'importo nella realizzazione degli interventi.

ABSTRACT

Debris flows are solid transport phenomenon with a high concentration of sediment, plant material, water and air, having a considerable destructive power and hydro-geological processes resulting from complex. It develop as a flood, which propagates downstream with speeds that can reach a few tens of meters per second and stop on the fan. These fan are most affected by rapid morphological changes during the flood events and, therefore, are characterized by increased levels of danger associated with a higher density of man-made structures. In defense of the man-made structures, forest ecosystems play an important role in the prevention and mitigation of natural hazards and therefore, the preservation of human settlements, in the defense of the agro-forestry-pastoral territory and more generally in environmental conservation.

The objective of this thesis was to analyze the effects of vegetation, trees and shrubs and its behavior during transport and deposition of debris flows by analyzing a real event was triggered 30 July 2012 on a small catchment in the upper valley of the Ansiei torrent in the province of Belluno.

In addition, through the use of numerical models FLO-2D and RIVERFLO-2D has been simulated the "beneficial" effect of played by the forest in limiting the danger of phenomenon such as debris flow towards the most sensitive human infrastructure.

Following the field surveys carried out in the summers of 2013 and 2014 was it possible to determine the total volume deposited in alluvial fan after the event, totaling approximately 15'000 m³; at a later time, thanks to the analysis performed by sampling particle size in this deposit, it was possible to determine the "rheology" of the debris flow included, according to the classification of Moscariello et al. (2001) in "debris flows Dolomite", thus confirming the results of geological analysis.

We calculated the volume through the approach starting from the hydrograph hydrologic-volumetric liquid, obtained with the model KLEM included in ADB-ToolBox software and calculating the resulting debrisgram using the method proposed by D'Agostino and Marchi (2004); this method has allowed us to calculate a volume so very similar with the survey in the field.

From the survey in the vegetable component, divided into "tree" and "shrub" in order to consider the different nature and behavior of the species, has emerged the proportional correlation between the diameter of the individual and the thickness of sediment trapped upstream, that the report between mortality and decreasing the diameter of the individuals recorded confirming what has already been detected and determined by Ishikawa et al.

(2003) and Mizuyama et al. (1988) as a result of their studies for debris flow occurred in Japan.

After a careful calibration of the models FLO-2D and 2D-RIVERFLO, we tried to simulate the effect of "beneficial" played by the forest component to limiting the dangers of the phenomenon causing reduction in stopping distance, speed and energy and limiting the possible "flood area".

From the simulations carried out were obtained, following the insertion of the plant component, results from run-out, volume and flood area significantly lower compared to simulations "no vegetation".

Specifically, the FLO-2D model, thanks to a greater precision in the definition of the rheological parameters in input values provided very accurate and almost identical with that found in reality.

It is therefore possible, in areas with a low human impact, to provide protection interventions following the natural way, carefully selecting and organizing the forestry component so as to ensure the protection function in the most efficient way possible; it would still be desirable to associate such protection to the interventions of anthropogenic retained, so as to limit the environmental impact, the amount of materials used in the construction and especially the amount of interventions.

INDICE

RIASSUNTO

ABSTRACT

1	SCOPO DELLA TESI.....	1
2	INTRODUZIONE.....	3
2.1	LE COLATE DETRITICHE O <i>DEBRIS FLOW</i>	6
2.1.1	Classificazione delle colate detritiche, reologia e geologia	7
2.1.2	Evoluzione e dinamica.....	12
2.1.3	Morfologia dei depositi interessati da eventi di colate detritiche	17
2.2	RUOLO DEI BOSCHI NELLA DIFESA DAI FENOMENI DA COLATA DETRITICA.....	21
2.2.1	Difesa dai fenomeni di colate detritiche.....	22
2.2.2	Selvicoltura nelle foreste di protezione da colate detritiche.....	23
2.2.3	Tecniche selvicolturali nelle foreste di protezione.....	24
2.3	MODELLI NUMERICI UTILIZZATI PER LA SIMULAZIONE DELLE COLATE	25
3	MATERIALI E METODI.....	27
3.1	AREA DI STUDIO	27
3.1.1	Inquadramento territoriale	27
3.1.2	Morfologia del bacino	28
3.1.3	Caratteristiche climatiche	29
3.2	PARAMETRI MORFOMETRICI DEL BACINO	31
3.2.1	Proprieta' lineari	32
3.2.2	Proprieta' areali	34
3.2.3	Proprieta' del rilievo	37
3.3	USO DEL SUOLO.....	39
3.4	ASSETTO GEOLOGICO	41
3.4.1	Rocce del substrato.....	42
3.4.2	Terreni di copertura	43
3.5	ANALISI DEL CONOIDE DEL BACINO	45
3.5.1	Descrizione del conoide del bacino	45
3.5.2	Descrizione vegetazionale del conoide.....	49
3.5.3	Descrizione dell'uso del suolo del conoide	51
3.6	ANALISI GRANULOMETRICA DEI DEPOSITI	52
3.7	STIMA DEL VOLUME O MAGNITUDO DEGLI EVENTI DI COLATA	54

3.7.1	Metodi empirici	54
3.7.2	Metodi geomorfici	55
3.7.3	Metodo idrologico	57
3.7.4	Stima del volume depositato sul conoide del bacino	59
3.8	RILIEVO DELLA VEGETAZIONE IN DEPOSITO	64
3.9	AREE DI SAGGIO PER IL RILIEVO DELLA COMPONENTE FORESTALE	66
3.9.1	Area non disturbata	66
3.9.2	Area disturbata	66
3.10	IL MODELLO IDROLOGICO PER LA DETERMINAZIONE DEGLI IDROGRAMMI	67
3.11	MODELLI NUMERICI DI SIMULAZIONE DI COLATE DETRITICHE	74
3.11.1	IL MODELLO NUMERICO BI-DIMENSIONALE FLO-2D	74
3.11.1.1	Teoria del modello	74
3.11.1.2	Criteri di stabilità numerica	76
3.11.1.3	Simulazione di <i>mud</i> e <i>debris flows</i>	77
3.11.2	IL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE RIVERFLO-2D	81
3.11.2.1	Teoria del modello	81
3.11.2.2	Condizioni idrodinamiche essenziali	82
3.11.2.3	Simulazione di <i>mud</i> e <i>debris flows</i>	84
3.11.3	VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DEI MODELLI	85
4	RISULTATI E DISCUSSIONE	87
4.1	RISULTATI DELLA STIMA DEI VOLUMI	87
4.1.1	Approccio di campo con elaborazione GIS	87
4.1.2	Modellazione idrogramma liquido e <i>debris</i> gramma di colata	89
4.1.2.1	Metodo d'agostino-marchi per la determinazione del <i>debris</i> gramma	91
4.1.2.2	Metodo flo-2d per la determinazione del <i>debris</i> gramma	92
4.2	RILIEVI GRANULOMETRICI	93
4.2.1	Rilievo granulometrico n.1	93
4.2.2	Rilievo granulometrico n.2	95
4.3	RISULTATI DEI RILIEVI VEGETAZIONALI	98
4.3.1	Area Di saggio "non disturbate"	99
4.3.2	Area Di saggio "disturbate"	103
4.3.2.1	Severità del fenomeno sulla componente ARBOREA	105
4.3.2.2	Severità del fenomeno sulla componente ARBUSTIVA	108
4.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON I MODELLI FLO-2D E RIVERFLO-2D	110
4.4.1	Simulazione effettuate con il modello FLO-2D	110
4.4.2	Simulazione effettuate con il modello RIVERFLO-2D	115
4.4.3	Valutazione dell'accuratezza delle simulazioni	118
5	DICUSSIONE DEI RISULTATI DEI MODELLI FLO-2D E RIVERFLO-2D	119
6	CONCLUSIONI	121
	BIBLIOGRAFIA	125

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Opere in massi con calcestruzzo nel bacino della Val della Vecchia. Fonte: D'Agostino V.	4
Figura 2 –Briglia di trattenuta (sx) e briglia frangi colata (dx). Fonte: D'Agostino V.....	4
Figura 3 - Schema della sezione longitudinale di una colata detritica.	6
Figura 4 – Fusi granulometrici del <i>debris flow</i> in diversi contesti geologici (Moscariello et al., 2001).....	11
Figura 5 - Valori di intensità critica per l'innescò di colata detritica (t espresso in ore e intensità in mm/h). ...	13
Figura 6 - Innescò di un <i>debris flow</i> per effetto idrante (Togancca e Bezzola, 1997).	14
Figura 7 - Continuità fra frane superficiali su versante e colata detritica in alveo torrentizio.	15
Figura 8 - Tipologie di depositi delle colate detritiche (May e Gresswell, 2004)	18
Figura 9 - Forme di deposito delle colate detritiche (VanDine, 1996).	20
Figura 10 - Inquadramento territoriale del bacino oggetto di studio.....	27
Figura 11 - Rappresentazione 3D dell'area oggetto di studio e del reticolo idrografico.	28
Figura 12 - Diagramma delle temperature e delle precipitazioni medie mensili relative all'area in studio.	29
Figura 13 - Accumuli detritici ai piedi della Croda Alta di Somprade.	30
Figura 14 - DTM del bacino con rappresentazione del reticolo idrografico.....	31
Figura 15 - Profilo longitudinale del collettore principale.	33
Figura 16 - Mappa raster delle pendenze e delle esposizioni.....	36
Figura 17 - Distribuzione areale per fasce di quota del bacino.....	37
Figura 18 - Curva ipsometrica dimensionale del bacino (in rosso la quota media).....	38
Figura 19 - Curva ipsometrica adimensionale del bacino (in rosso la bisettrice)	38
Figura 20 - Ortofoto del 2012 e carta d'uso del suolo, tagliata sul bacino e reticolo idrografico.	39
Figura 21 - Grafico con i valori percentuali secondo le categorie d'uso del suolo del bacino.	40
Figura 22 – Dolomia principale - Cima della Croda Alta di Somprade.....	42
Figura 23 - Ortofoto con rappresentazione dei terreni di copertura “sciolta nuda”.....	43
Figura 24 - Copertura "nuda" adiacente al collettore principale che scende dalla Croda di Somprade.....	43
Figura 26 - Copertura sciolta "vegetata" diffusa nelle aree medio-basse del bacino	44
Figura 25 - Ortofoto con rappresentazione dei terreni di copertura “sciolta vegetata”.	44
Figura 27 – Isolinee a 10 m del deposito originatosi in seguito all'evento analizzato.	46
Figura 28–Foto scattata nella parte terminale del conoide, nei pressi del torrente Ansiei.	47
Figura 29 - Panoramica del conoide nelle aree sotto-copertura della parte bassa del bacino.....	48
Figura 30 - Foto dei depositi a forma "lobata" nelle aree sotto-copertura della parte bassa del bacino.	48
Figura 31 - Carta delle regioni forestali con indicazione dell'area di studio. (Del Favero 2004).....	49
Figura 32 – Ortofoto con indicazione delle tipologie forestali rientranti nel conoide del bacino.	50
Figura 33 - Ortofoto con indicazione delle tipologie d'uso del suolo presenti nel conoide del bacino.....	51
Figura 34 - Rappresentazione 3D dello spartiacque (rosso) e del conoide (giallo) del bacino.	59

Figura 35 – Individuazione del conoide detritico depositatosi in seguito alla colata del 30 luglio 2012.	60
Figura 36 - Ortofoto con rappresentazione degli individui forestali rilevati in conoide.	65
Figura 37 - Schema del metodo SCS.	68
Figura 38 - Dem depittato, direzioni di deflusso, area drenata e CN del bacino in studio.....	72
Figura 39 - Screenshot delle schermate relative al modello K.L.E.M. di Adb-ToolBox.	73
Figura 40 - Diverse condizioni idrodinamiche impiegate dal software RIVERFLO-2D.	82
Figura 41 - Schema di funzionamento del codice "bc-type 6" assegnato al modello.....	83
Figura 42 - Screenshot esemplificativo della schermata <i>mud/debris flow</i> del software.	84
Figura 43 - Identificazione delle tre sottoaree X, Y e Z tramite la sovrapposizione dell'area simulata e quella osservata (da Scheidl e Rickenmann, 2010).	86
Figura 44 - Grafici riassuntivi rappresentanti spessori e volumi medi del deposito.	88
Figura 45 - Ortofoto con indicazione della Stazione ARPAV di "Auronzo" e del bacino in studio.	89
Figura 46 - Ietogramma evento meteorico del 30 luglio 2012.....	90
Figura 47 - Idrogramma solido-liquido del debris flow calcolato con metodo D'Agostino-Marchi.	91
Figura 48 - Idrogramma solido-liquido del debris flow calcolato con metodo FLO-2D.....	92
Figura 49 - Area del rilievo granulometrico n.1 a monte della strada silvo-pastorale e relative coordinate. ...	93
Figura 50 - Frequenza relativa e cumulata delle classi diametriche del rilievo 1.	94
Figura 51 - Area del rilievo granulometrico n.2 alla fine del deposito e relative coordinate.	95
Figura 52 - Frequenza relativa e cumulata delle classi diametriche del rilievo n.2.	96
Figura 53 - Geologia correlata alla frequenza cumulata e alla granulometria dei depositi di colata per i due campioni granulometrici (Moscariello et al., 2001).....	97
Figura 54 - Ortofoto 2012 con indicazione delle aree di saggio rilevate.	98
Figura 56 - Foto dell'area di saggio n.1	99
Figura 55 - Frequenza specie area saggio 1	99
Figura 57 - Diametro e area basimetrica specie area di saggio n. 1.....	100
Figura 59 – Individui di <i>Pinus sylvestris</i> presenti nell'area n.3.....	101
Figura 58 - Frequenza specie area saggio 3	101
Figura 60 - Diametro e area basimetrica specie area di saggio n. 3.....	102
Figura 61 - Frequenze relative all'area disturbata.	103
Figura 62 - Abrasioni e maggiori depositi rilevati negli individui campionati.	104
Figura 63 - Relazione diametro - spessore del deposito relativi alla componente arborea.....	106
Figura 64 - Relazione diametro – percentuale morti relativi alla componente arborea.	106
Figura 65 - Relazione diametro – percentuale morti – spessore del deposito.	107
Figura 66 - Relazione diametro - spessore del deposito relativi alla componente arbustiva.	108
Figura 67 - Relazione diametro – percentuale morti relativi alla componente arbustiva.....	109
Figura 68 - Relazione diametro – percentuale morti – spessore del deposito.	109
Figura 69 - Altezze di deposito senza vegetazione con il modello FLO-2D.....	112
Figura 70 - Velocità massima della colata senza vegetazione con il modello FLO-2D.....	112

Figura 71 - Altezze di deposito CON vegetazione “singola” con il modello FLO-2D.....	113
Figura 72 - Velocità massima della colata CON vegetazione “a gruppi” con il modello FLO-2D.	113
Figura 73 - Altezze di deposito CON vegetazione “singola” con il modello FLO-2D.....	114
Figura 74 - Velocità massima della colata CON vegetazione “a gruppi” con il modello FLO-2D.	114
Figura 75 - Altezze di deposito senza vegetazione con il modello RIVERFLO-2D.....	116
Figura 76 - Velocità massima della colata senza vegetazione con il modello RIVERFLO-2D.....	116
Figura 77 - Altezze di deposito CON vegetazione “singola” con il modello RIVERFLO-2D.....	117
Figura 78 - Velocità massima della colata CON vegetazione “a gruppi” con il modello RIVERFLO-2D.	117
Figura 79 - Altezze di deposito CON vegetazione “singola” con il modello RIVERFLO-2D.....	117
Figura 80 - Velocità massima della colata CON vegetazione “a gruppi” con il modello RIVERFLO-2D.	117

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Relazione tra pendenza e comportamento delle colate dalla zona di formazione alla zona di deposizione (Van Dine, 1996).....	13
Tabella 2 - Valori di pendenza in fase di arresto dei <i>debris flow</i> non confinati.	16
Tabella 3 - Tabella riportante caratteristiche minime ed ideali relative alle foreste di protezione	24
Tabella 4 - Proprietà lineari del bacino.	34
Tabella 5 - Proprietà areali del bacino.	34
Tabella 6 - Quadro riassuntivo dei parametri morfomerici del bacino.	35
Tabella 7 - Proprietà morfometrico-topografiche del conoide in studio.....	45
Tabella 8 - Valore del coefficiente k , con esponente fisso $\beta=2/3$ a seconda dei processi presenti.	55
Tabella 9 - Valori indicativi dell'apporto detritico per unità di lunghezza per diversi tipi di alvei torrentizi.	56
Tabella 10 - Tabella esplicativa dei parametri utilizzati nel metodo SCS.....	68
Tabella 11 - Comportamento dei flussi in funzione della cv di sedimento (Julien e O'Brien, 2009).	78
Tabella 12 - Parametri di resistenza per flussi laminari impiegati nel modello FLO-2D.	80
Tabella 13 - Sforzo tangenziale critico e viscosità come funzioni della concentrazione di sedimento.	80
Tabella 14 - Tipo di regime e parametri da fornire al modello per la condizione " <i>open boundary</i> ".	83
Tabella 15 - Bc-type possibili da fornire alle celle di <i>inflow</i>	83
Tabella 16 - Calcolo degli spessori medi e volumi medi del conoide.	88
Tabella 17 - Analisi evento meteorico del 30 luglio 2012.....	90
Tabella 18 - Parametri avanzati di input forniti al software AdB ToolBox per la simulazione dell'evento.....	90
Tabella 19 - Valori e volumi dell'idrogramma solido-liquido del debris flow con metodo D'Agostino-Marchi. .	91
Tabella 20 – Valori e volumi relativi all'idrogramma solido-liquido del debris flow con metodo FLO-2D.....	92
Tabella 21 - Dati elaborati e diametri caratteristici del rilievo granulometrico n.1.	94
Tabella 22 - Coefficienti e indici del rilievo granulometrico n.1.	95
Tabella 23 - Dati elaborati e diametri caratteristici del rilievo granulometrico n.2.	96
Tabella 24 - Coefficienti e indici del rilievo granulometrico 2.	97
Tabella 25 - Caratteristiche area di saggio n.1	100
Tabella 26 - Caratteristiche area di saggio n.3	102
Tabella 27 - Valori di accuratezza delle simulazioni effettuate con i modelli FLO-2D e RIVERFLO-2D.	118
Tabella 28 - Confronto dei risultati emersi dai modelli FLO-2D e RIVERFLO-2D.....	119

1 SCOPO DELLA TESI

Il ruolo svolto dagli ecosistemi forestali nella prevenzione e mitigazione degli impatti negativi causati dagli eventi naturali, risulta di fondamentale importanza soprattutto nelle fasi di salvaguardia e protezione, non solo dei nuclei abitativi, ma anche di infrastrutture e reti di comunicazione.

In particolare la “componente bosco”, intesa come popolamento forestale caratterizzato da vegetazione arborea con l’associata e minoritaria componente arbustiva, nei confronti di fenomeni di colata detritica, svolge un’efficace azione di *protezione passiva* soprattutto nelle zone di transito, dissipando fortemente l’energia totale, e nelle zone di deposizione, riducendo la distanza di arresto (*runout*), limitando l’area coinvolta dal fenomeno e quindi riducendo o annullando la pericolosità ad esso associata.

Nonostante ciò, secondo quanto reperito in bibliografia, risultano limitati gli studi che mettono in relazione l’azione svolta dalla componente forestale nei confronti dei fenomeni di *debris flow* sul processo di trasporto e deposito, non solo riferiti all’area geografica delle Alpi nord-orientali, ma per tutto l’arco alpino.

Molto importante risulta un’accurata definizione di una procedura univoca per derivare la reale pericolosità di un determinato sito nei confronti di un qualsiasi fenomeno naturale (colate, caduta massi, valanghe) e poter predisporre tutte le componenti necessarie alla prevenzione, gestione e previsione del pericolo, considerando in ogni caso il ruolo efficace svolto dalla vegetazione.

Con la presente tesi sono stati indagati ***gli effetti reciproci tra la vegetazione***, arborea ed arbustiva e il fenomeno delle colate detritiche ponendo l’attenzione sul ***comportamento indotto durante le fasi di trasporto e deposizione***. L’analisi è stata condotta su un evento reale innescatosi nella tarda serata del 30 luglio 2012 su un piccolo bacino affluente in destra idrografica del Torrente Ansiei. Inoltre si è tentato di ***simulare l’effetto “benefico” del bosco con due modelli numerici*** commerciali: FLO-2D e RIVERFLO-2D.

2 INTRODUZIONE

In ambiente montano, uno dei problemi più importanti, non solo della pubblica amministrazione, ma di tutta la collettività, è rappresentato dalla sicurezza delle popolazioni che vi vivono stabilmente ed occasionalmente. Particolare importanza in questo contesto spetta al concetto di dissesto idrogeologico che, con le sue più svariate forme di accadimento, mette a serio rischio la vita delle popolazioni.

Per chiarire il concetto di dissesto idrogeologico è necessario innanzitutto spiegare il significato di un altro termine, simile ma non uguale, ovvero il rischio idrogeologico.

Con il termine rischio idrogeologico si indica il rischio connesso all'instabilità dei pendii dovuta alla particolare conformazione geologica e geomorfologica di questi e in conseguenza di particolari condizioni ambientali, meteorologiche e climatiche che coinvolgono le acque piovane ed il loro ciclo una volta cadute al suolo. Possibili conseguenze riguardano la stabilità dei versanti, l'incolumità della popolazione, la sicurezza dei servizi e le attività di un determinato territorio. Tale rischio si manifesta attraverso l'incremento di fenomeni franosi e smottamenti.

Si perviene dunque al concetto di dissesto idrogeologico il quale, secondo le molteplici definizioni reperibili in letteratura, è l'insieme dei processi morfologici che hanno un'azione fortemente distruttiva in termini di degradazione del suolo e quindi indirettamente nei confronti delle strutture antropiche.

Il termine di dissesto idrogeologico comprende perciò un insieme di processi che possono pregiudicare la vita delle popolazioni quali: alluvioni, colate laviche, caduta e rotolamento di massi verso valle crolli di pareti rocciose, incendi boschivi, terremoti, valanghe e infine, non ultimo per importanza, eventi di colate detritiche definiti tecnicamente *debris flow*.

Quest'ultimi sono caratterizzati da un flusso di acqua e materiale solido che tipicamente si origina dalle pendici o dai piccoli impluvi, s'incanala nelle valli e raggiunge le conoidi alluvionali depositando talvolta ingenti quantità di materiale, investendo e, nei casi più disperati, distruggendo tutto ciò che incontra lungo il suo percorso.

L'uomo nel corso degli anni ha sviluppato una serie di misure per limitare e/o evitare i rischi derivanti da questo fenomeno. Tali opere si distinguono in:

- Misure di protezione ATTIVE
- Misure di protezione PASSIVE

Le misure di protezione attive prevengono o, nella migliore delle ipotesi evitano l'innesco del fenomeno di colata andando a stabilizzare il canale, potenzialmente generatore di *debris flow*, nelle zone di testata contro lo scivolamento del "pendio-canale". Rientrano in questa tipologia di opere le soglie di stabilizzazione e le opere in massi consolidati con calcestruzzo per stabilizzare il fondo (Figura 1).



Figura 1 - Opere in massi consolidati con calcestruzzo nel bacino della Val della Vecchia. Fonte: D'Agostino V.

Le misure di protezione passive invece limitano l'effetto di alluvionamento dei fenomeni di colata in caso di evento, trattenendo favorendo la deposizione del materiale detritico in aree prestabilite. Rientrano in questa tipologia di opere le briglie frangicolata e di trattenuta (Figura 2).



Figura 2 –Briglia di trattenuta (sx) e briglia frangi colata (dx). Fonte: D'Agostino V.

Le colate detritiche possono avere differenti caratteristiche ed effetti sul territorio, in funzione della loro concentrazione, della distribuzione spaziale delle particelle all'interno della corrente e della composizione granulometrica del sedimento (*stony debris flow* o *mud flow*).

Gli effetti più gravi del passaggio di una colata si riscontrano alla base dei versanti, nelle aree di conoide, laddove, a seguito del rallentamento dovuto alla diminuzione della pendenza e l'ampliamento della sezione del canale, il flusso detritico inizia il processo di deposizione, interessando aree spesso occupate da insediamenti urbani e/o infrastrutture. Infatti, la minore pendenza favorisce l'arresto improvviso del fronte granulare e l'aumento della profondità del flusso del corpo che, in molti casi, fuoriesce dalle sponde del canale diffondendosi sul conoide alluvionale e formando ampi lobi laterali e terminali.

I conoidi interessati e condizionati da fenomeni di *debris flows* sono quelli più esposti a rapidi cambiamenti morfologici nel fondovalle in occasione degli eventi alluvionali e, quindi, sono caratterizzati dai maggiori livelli di pericolosità. La pericolosità di questi processi è da attribuire principalmente alle ingenti quantità di materiale solido che possono essere mobilitate e giungere a valle, e dal breve periodo di tempo entro il quale solitamente si innescano e si esauriscono le onde di piena. Questi dipendono a loro volta dall'acclività dei versanti dei bacini idrografici, ai quali si associa spesso anche un elevato rifornimento di materiale detritico e delle aste torrentizie, responsabile dell'alta velocità ed energia del flusso. Inoltre, la rapidità con il quale si esplicano i fenomeni di piena è dovuta alla ridotta dimensione dei bacini, spesso dell'ordine di pochi chilometri quadrati che, associato alle forti pendenze, determina ridotti tempi di corrivazione.

2.1 LE COLATE DETRITICHE O *DEBRIS FLOW*

I “*debris flow*” sono flussi d’acqua e materiale solido con concentrazione volumetrica dei sedimenti tale da non poter più assimilare il loro movimento a quello dell’acqua, a causa di una viscosità di diversi ordini di grandezza più elevata (D’Agostino, 2006). Ulteriore definizione, analizzando il punto di vista dinamico e reologico, è quella proposta da Hungr et al. (2001) che definiscono, all’interno della classificazione dei movimenti di massa, i *debris flow* come “da rapidissimi fino ad estremamente rapidi flussi di detriti, saturati, non plastici, in alvei pendenti”.

I *debris flow* consistono in un “corpo di sedimenti in movimento” che, come rappresentato in Figura 3, nel complesso, possono essere distinte tre regioni:

- il **fronte** costituito dalla parte più grossolana dei detriti, spesso massi ciclopici, che, talvolta preceduto da una colata di fango di cospicue dimensioni, funge da apripista e presenta uno spessore maggiore rispetto al resto della colata;
- il **corpo** con altezza del flusso pressoché uniforme e materiale costituente più fine rispetto il fronte e che appare più fluido. A seconda della reologia il *debris flow* può muoversi in regime completamente laminare, ma più frequentemente mostra un moto turbolento;
- la **coda** rappresenta la parte terminale del flusso, dove la concentrazione dei sedimenti diminuisce significativamente ed il flusso si comporta come acqua fangosa turbolenta.

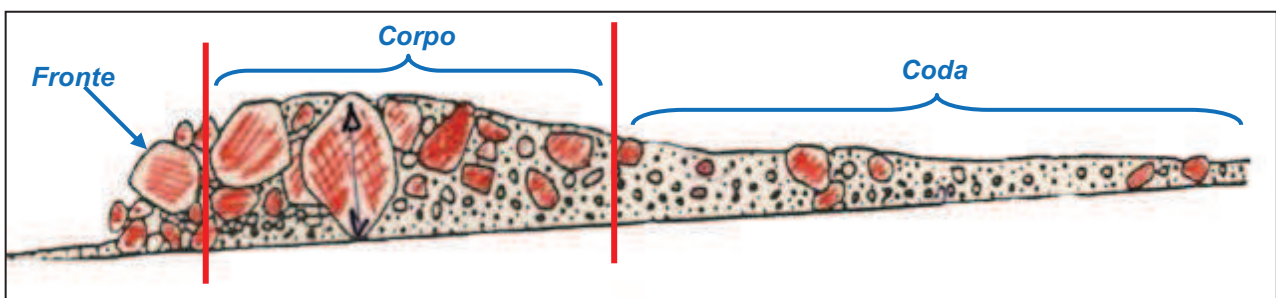


Figura 3 - Schema della sezione longitudinale di una colata detritica.

La velocità di una colata è strettamente dipendente dalle caratteristiche del materiale (granulometria, concentrazione e assortimento) e dalla geometria del canale (forma, pendenza e sinuosità). Nel complesso varia da 1 m/s a 10 m/s ma in alcuni casi le velocità del fronte possono superare i 20 m/s (Major, 1996).

Le densità variano tra i 1400 kg/m^3 , per colate ad alto contenuto liquido, e i 2500 kg/m^3 , per colate relativamente asciutte e concentrazioni volumetriche rispettivamente tra il 25% e il 70-80%. Colate con densità inferiori a 1800 kg/m^3 vengono classificate come correnti iperconcentrate di sedimenti e non vere e proprie colate detritiche.

2.1.1 CLASSIFICAZIONE DELLE COLATE DETRITICHE, REOLOGIA E GEOLOGIA

La classificazione dei *debris flow* è complessa e articolata: se basata su caratteristiche fisiche spesso si rivelano limitate e poco coerenti, mentre, se basate sulle caratteristiche del flusso sono difficili da utilizzare nella pratica.

In letteratura esistono diverse classificazioni dei *debris flow*; quando si considera la natura del materiale coinvolto, le proporzioni fra acqua e materiale solido, e altre caratteristiche fisiche lo scopo è quello di differenziare i *debris flow* da fenomeni simili (*earth flow*, *mud flow*, *solifluction*, *debris avalanche*, *grain flow*, *debris flood*); quando invece si distingue il tipo di flusso che si osserva dal punto di vista reologico, allora lo scopo è quello di conoscere il meccanismo che governa lo scorrimento dei materiali coinvolti. Il comportamento e le diverse forme in cui una colata detritica si può manifestare dipendono principalmente dagli attriti interni al flusso, dagli urti e dalla viscosità del fluido interstiziale. Una valida classificazione riguardante questo scopo è quella proposta da Takahashi e Ghilardi et al. (1999) i quali hanno innanzitutto differenziato tra colate viscosi (o macroviscosi) e colate inerziali. Quest'ultime sono state ulteriormente suddivise in pietrose, immature, fangose e ibride.

- **DEBRIS FLOW MACROVISCOSO**

I *debris flows* macroviscosi sono caratterizzati dalla laminarietà del moto; il fluido interstiziale può essere costituito da sola acqua (in questo caso il regime macroviscoso si verifica quando la concentrazione dei sedimenti nella corrente è superiore al 45-50%) oppure da acqua con una grande quantità di argilla in sospensione (in questo caso si può avere regime macroviscoso anche per concentrazioni solide inferiori attorno al 30%). Il flusso viene modellato, introducendo un opportuno valore della viscosità, utilizzando le medesime equazioni derivate da quelle delle correnti laminari di acqua. In questo regime di moto la distribuzione della velocità è simile a quella dell'acqua e quindi viene modellato secondo un modello per i fluidi pseudo-newtoniani. Le caratteristiche essenziali sono il regime laminare monofasico con materiale trasportato relativamente fine (sabbie e ghiaie)

in una matrice caratterizzata dalla presenza di argille e limi. Il flusso viene considerato nella tipologia di “fluido Newtoniano” con moto laminare (con numero di Reynolds, Re , inferiore a 500), e l’equazione che descrive lo sforzo tangenziale agente è la seguente:

$$\tau = \mu \frac{du}{dv} \quad [1]$$

Dove: μ è la viscosità dinamica del *debris flow* (si tratta di viscosità newtoniana apparente), data dalla somma della viscosità del fluido interstiziale della viscosità aggiuntiva dovuta alla presenza delle particelle solide mentre il rapporto du/dv viene definito deformazione angolare o *shear rate* ed esprime la differente velocità che assumono due piani paralleli all’interno del fluido in esame. La viscosità apparente μ si stima partendo dalla velocità superficiale della colata V_{sup} , impiegata nell’equazione di Poiseuille (adattata da Pierson, 1980) per la velocità superficiale:

$$\mu_{sup} = \frac{\gamma_b \sin\beta h^2}{2 V_{sup}} \quad [2]$$

Dove: γ_b rappresenta il peso specifico del “fluido”; β indica l’inclinazione del fondo (in gradi); h esprime l’altezza del fronte della colata e V_{sup} indica la velocità superficiale della colata.

Con l’aggiunta di un parametro k , che tiene conto della forma della sezione trasversale del canale di scorrimento, il parametro della viscosità verrà calcolato con:

$$\mu_{sup} = \frac{\gamma_b \sin\beta h^2}{K V_{sup}} \quad [3]$$

Dove: K è un coefficiente di forma che dipendente della geometria della sezione trasversale di scorrimento del flusso e vale 3 per sezioni rettangolari e larghe, circa 5 per le sezioni trapezoidali e infine 8 per le sezioni semicircolari.

- **DEBRIS FLOW INERZIALI**

- **COLATE DETRITICHE GRANULARI (*Stony debris flow*)**

Nello *stony debris flow* (corrente detritica matura) il sedimento è distribuito sull’intera profondità della corrente. A causa della grande concentrazione solida (almeno il 20%), che consente frequenti contatti fra le particelle, gli sforzi interni alla corrente, originati dagli urti

e dagli sfregamenti, sono capaci di mantenere sospesi i granuli fino alla superficie libera. La turbolenza del miscuglio è modesta e, nel suo complesso, il moto si avvicina al regime laminare. La turbolenza del fluido contenuto negli interstizi della matrice solida, pur essendo limitata dall'esiguo spazio disponibile, pari grossomodo alla distanza media fra i granuli, è a volte sufficiente a tenere sospese le particelle di granulometria più fine che tendono a seguire il medesimo movimento dell'acqua contenuta nei pori e con essa costituiscono un fluido interstiziale di densità maggiore di quella dell'acqua. Lo sforzo tangenziale è dovuto ai contatti fra i granuli: la viscosità "apparente" del miscuglio è molto elevata. Le pressioni ("dispersive") tra le particelle spingono verso l'alto i sedimenti di maggiori dimensioni.

Le caratteristiche essenziali sono il regime laminare, o debolmente turbolento, e monofasico con materiale trasportato grossolano (ciottoli e in alcuni casi massi ciclopici) in una matrice caratterizzata dalla presenza di sabbie e ghiaie, nel complesso fine.

➤ **COLATE DETRITICHE IMMATURE (*Immature debris flow*)**

Nell'*immature debris flow* il sedimento è concentrato prevalentemente nello strato inferiore della corrente ed è sovrastato da acqua che può contenere qualche particella in sospensione. Anche in questo caso gli sforzi tangenziali all'origine della resistenza al moto sono principalmente dovuti agli urti fra i granuli. Il regime di corrente detritica immatura può mantenersi lungo tutto il percorso della colata oppure può presentarsi nella fase della sua formazione per evolvere successivamente a *stony debris flow* nelle condizioni di moto a regime; viceversa, una corrente detritica immatura può formarsi in zone di decelerazione quando la collisione e lo sfregamento tra le particelle solide non sono più sufficienti a mantenere i granuli distribuiti nell'intera sezione trasversale oppure quando la colata viene diluita da apporti di acqua (immissioni da sottobacini).

➤ **COLATE DETRITICHE FANGOSE (*Turbulent mud flow*)**

Nel *turbulent mud flow* (corrente fangosa turbolenta) lo sforzo tangenziale turbolento del fluido interstiziale, la cui intensità è paragonabile a quella dello sforzo intergranulare, è in grado di mantenere in intenso movimento il sedimento avente diametro rappresentativo dell'ordine di qualche millimetro o, al massimo, di un centimetro. Per granuli delle dimensioni di qualche millimetro la forza di adesione di natura elettrochimica tra le particelle è trascurabile; inoltre, se la concentrazione non è troppo elevata, l'effetto

dell'attrito fra particelle solide risulta minore dell'effetto prodotto dalle collisioni. La corrente evidenzia grossi vortici che indicano la presenza di turbolenza a larga scala.

Le caratteristiche essenziali sono il regime turbolento bifasico, discretizzato tra il moto del sedimento e quello dell'acqua con materiale trasportato medio-fine (ciottoli e sassi) in una matrice caratterizzata dalla presenza di sabbie e ghiaie, nel complesso fine.

Takahashi nel 1999, ipotizzò che la resistenza generata da un moto turbolento non fosse differente da quella dell'acqua chiara, suggerendo pertanto l'utilizzo della formula di Manning:

$$V = \frac{1}{n} \sqrt{\sin\beta} \sqrt[3]{R_h^2} \quad [4]$$

Dove: n è il *numero di Manning* ($n \approx 0.1$) ed esprime la scabrezza del fondo del canale; R_h è il Raggio Idraulico calcolato dal rapporto tra l'area della sezione A ed il contorno bagnato C .

GEOLOGIA

La geologia può essere utile a comprendere la tipologia di colata attesa. Le analisi granulometriche condotte sui depositi di numerose colate detritiche nelle Alpi italiane hanno evidenziato la stretta correlazione tra la geologia e il comportamento di colata detritica (Moscariello et al., 2001). (Figura 4)

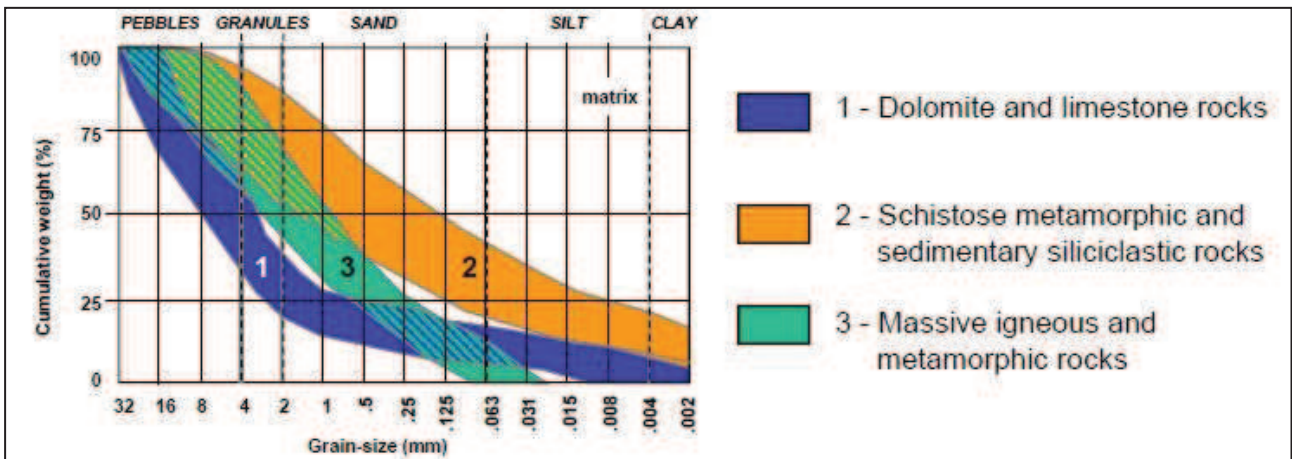


Figura 4 – Fusi granulometrici della matrice di debris flow in diversi contesti geologici (Moscariello et al., 2001)

In seguito allo studio condotto da Moscariello et al. (2001) sono evidenti tre grandi gruppi di depositi, caratterizzati da processi sedimentari dipendenti in base alle caratteristiche geologiche del materiale costituente il bacino idrografico; in particolare si evidenzia che:

- (1) Rocce dolomitiche e calcaree generano colate detritiche con comportamento variabile a seconda della loro concentrazione solido-volumetrica; tali colate, se dominate da granulometrie grossolane (ghiaie e sabbie), tendono ad assumere un comportamento di tipo macroviscoso, a causa dell'elevata presenza di limo e sabbia fine.
- (2) Rocce metamorfiche scistose e sedimentarie generano maggiormente colate fangose con inglobate al loro interno una modesta quantità di detriti grossolani.
- (3) Rocce ignee e metamorfiche massicce: si generano generalmente colate granulari non coesive, con basso contenuto di argille e limi.

2.1.2 EVOLUZIONE E DINAMICA

Riferendosi a quanto avviene in alveo, durante l'evento di *debris flow* si possono individuare diverse fasi evolutive (Bardou 2002):

- fase pre-evento: un'onda d'acqua, precede l'arrivo del *debris flow*;
- fase di fronte: è preceduto da un flusso iperconcentrato che viene sempre seguito dal corpo e dalla formazione degli argini laterali, ma non necessariamente separato da una coda rispetto all'onda seguente;
- la fase principale: durante la quale fluisce la parte più consistente della colata; gli argini laterali si formano se la topografia del canale segue il *debris flow*;
- fase finale: la coda segue il corpo, il flusso è passato e il canale inizia a riempirsi di depositi; massi isolati traslano nel canale;
- fase post evento: l'alveo è sgomberato; il materiale proveniente dall'erosione degli argini o dei depositi, viene portato a valle dall'acqua.

Dal punto di vista generale si possono distinguere 3 zone: innesco, trasporto e deposito.

INNESCO

Le colate detritiche possono essere classificate secondo le modalità di innesco in:

- Colata innescata da uno scroscio: il materiale destabilizzato che contiene più acqua si muove su una pendenza elevata (versante) e si trasforma in *debris flow*.
- Frana di grande scala che ostruisce temporaneamente l'alveo: il materiale collassato, con un alto contenuto d'acqua, comincia a muoversi per effetto del peso proprio, oppure la "diga naturale" viene rotta dall'azione dell'acqua (pressione + erosione al piede).
- Piena improvvisa che erode le sponde ed il letto dell'alveo: la corrente, che contiene già un'alta concentrazione di materiale solido, si trasforma progressivamente in un *debris flow*.

Da tale classificazione è facilmente comprensibile che la formazione di un *debris flow* è legata alla concomita presenza di pendenze elevate, di ingenti quantitativi di acqua combinati alla disponibilità di materiale movimentabile, derivante sia dai processi degradativi naturali conseguenti ad esempio all'azione gelo-disgelo, sia dalla movimentazione di materiale superficiale instabile causata dall'azione erosiva dell'acqua che scorre sulla superficie del terreno.

Disponibilità idrica

Dai risultati degli studi condotti analizzando eventi di colata detritica si è giunti nell'affermare che gli eventi di colata detritica sono innescati per lo più da episodi temporaleschi brevi (dai 15 ai 90 minuti) e molto intensi (tempo di ritorno compreso tra i 150 e 200 anni), tali da smuovere il materiale detritico superficiale senza mai raggiungere il massimo livello di saturazione del terreno. Al fine di determinare l'intensità critica, potenzialmente generatrice di colata detritica, utili possono essere le formule proposte da Caine (1980) e Ceriani (1994) le quali individuano l'intensità critica per l'innescamento della colata correlata alla durata di precipitazione.

Caine (1980): $I = 14.82 t^{-0.39}$
Ceriani (1994): $I = 16.24 t^{-0.46}$

Figura 5 - Valori di intensità critica per l'innescamento di colata detritica (t espresso in ore e intensità in mm/h).

Acclività dei versanti

Nei versanti alpini con inclinazioni oltre il 70% sono frequenti fenomeni erosivi superficiali e frane (fratture nel terreno che causano la saturazione e il distacco di grandi masse di materiali). In Tabella 1 si riporta la relazione, determinata da Van Dine, 1996, tra la pendenza ed il comportamento delle colate dalla formazione alla deposizione.

Tabella 1 - Relazione tra pendenza e comportamento delle colate dalla zona di formazione alla zona di deposizione (Van Dine, 1996).

PENDENZA DEL FONDO	COMPORTAMENTO DELLA COLATA
> 36%	Formazione
27% - 36%	Formazione e movimento
18% - 27%	Rallentamento (movimento)
5% - 18%	Arresto o decelerazione del fronte
< 5%	Deposizione

Tipologie delle zone di innescamento

Appurato che eventi di colate detritiche si verificano su pendii assai ripidi vi possono essere due grandi tipologie di zone potenziali per l'innescamento di un evento di colata detritica:

1. INNESCO DA FRANE SUPERFICIALI IN MATERIALE COLLUVIALE

Tali aree vengono definite anche "zone di convergenza topografica", nelle quali si i deflussi superficiali si concentrano e producono un'erosione areale con energia variabile a

seconda dell'acclività del pendio, degli attriti interni del terreno e della presenza di ostacoli lungo il percorso. L'acqua di precipitazione, che si infiltra rapidamente negli strati superficiali del suolo, in alcuni casi rimane "invasata" nel sottosuolo contribuendo ad alimentare il deflusso sotto-superficiale; di conseguenza appurato che il livello idrometrico della falda aumenta all'aumentare, sia della durata che dell'intensità di precipitazione, questa contribuisce a destabilizzare ancor di più il terreno. Questa tipologia di erosione provoca un progressivo spostamento del materiale sedimentario, e culmina nella sua asportazione dall'area di origine, dove si accumulano nuove particelle provenienti dai processi disgregativi, e il conseguente trasporto a valle.

2. INNESCO DA MATERIALE COSTITUENTE UNA FALDA DETRITICA

Questo tipo di dissesto è tipico delle aree alpine, più dettagliatamente nell'area dolomitica. Tali aree si sviluppano al piede dei grandi affioramenti rocciosi in seguito al continuo crollo e deposito di sedimenti provenienti dalla disgregazione del materiale litologico soprastante. Questi depositi detritici costituiscono siti spesso interessati dall'innescò di colate detritiche in occasione di eventi piovosi intensi, nei quali la rapida concentrazione di deflussi liquidi nei canali rocciosi che solcano le pareti soprastanti. Si verifica così una corrente idrica "a getto" che impatta sul materiale detritico sciolto della falda comportandone la mobilitazione e il conseguente scorrimento verso valle di tali sedimenti; tale azione viene definita "**effetto idrante**". Secondo Tognacca e Bezzola, 1997 in seguito a fenomeni di tale causa si osserva sia l'erosione localizzata del pendio, sia la destabilizzazione di una porzione più o meno incisa di canale a causa dell'innalzamento della falda per gli apporti idrici provenienti dalla precipitazione. (Figura 6)

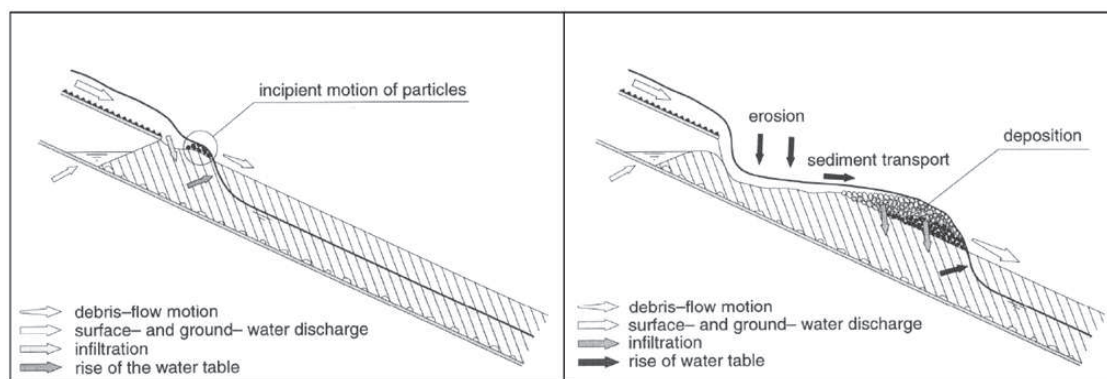


Figura 6 - Innesco di un debris flow per effetto idrante (Tognacca e Bezzola, 1997).

Nonostante la maggior parte delle colate detritiche si generino nelle aree sopra descritte, vi possono essere alcuni casi particolari relativi all'innescò quali continuità fra frane superficiali su versante e colata detritica in un alveo torrentizio (Figura 7) oppure lo

svuotamento di un piccolo vaso presente al fronte di un ghiacciaio in seguito al collasso della morena frontale.



Figura 7 - Continuità fra frane superficiali su versante e colata detritica in alveo torrentizio.

Altre possibili aree di innesco infine si possono rilevare in alvei torrentizi in seguito al crollo di briglie di consolidamento, in aree recentemente abbandonate dal permafrost e nelle falde detritiche e tratti superiori di torrenti in seguito al repentino scioglimento di nevai e ghiacciai (ad es. in seguito a fenomeni vulcanici).

IL TRASPORTO

Una volta innescato, il *debris flow* tendenzialmente percorre tutto il reticolo principale fino a raggiungere il conoide di deiezione dove spesso esce dall'alveo (avulsione) spargendosi su un'ampia area ed arrestandosi.

Durante il trasporto, la colata può provocare l'erosione al fondo del canale ove scorre: il passaggio della massa di detriti in movimento esercita una forza di attrito al fondo tale da asportare il materiale non consolidato presente in alveo prendendolo in carico. In questa fase, come rappresentato in Figura 3, il flusso assume la sua conformazione caratteristica con un fronte dove sono concentrati gli elementi più grossolani e una coda costituita dalla matrice più fine. È proprio la presenza del materiale di maggiori dimensioni nella parte frontale dell'onda a determinare la notevole forza di impatto che caratterizza i *debris flows*. Bagnold ha spiegato l'accumulo degli elementi più grossolani, il cui peso può anche essere di qualche tonnellata, nel fronte della colata con il fatto che il loro moto avviene

nello strato superiore della corrente, animato dai valori di velocità più elevati e dagli urti del materiale sottostante. È proprio questo uno dei principali fattori che determinano la notevole forza di impatto della colata.

Sono considerate zone di erosione i tratti di canale che presentano pendenze consistenti, generalmente maggiori del 20%.

IL DEPOSITO

Il conoide alluvionale è l'area preferenziale dove avviene il processo di deposizione delle colate detritiche per l'effetto della perdita dell'energia cinetica del flusso conseguente ad una diminuzione della pendenza del letto o dell'ampliamento del canale.

Da uno studio condotto da Hungr et al., 1984, è emerso che l'inizio del deposito avviene su pendenze tra 8° e 12° (14 e 21%), per canali confinati, e tra i 10° e 14° (18 e 25%, fino anche al 36%) per canali non confinati; tali valori possono essere confrontati con quelli stabiliti da D'Agostino ottenuti in seguito all'analisi dei bacini dell'Italia nord-orientale (Tabella 2).

Tabella 2 - Valori di pendenza in fase di arresto dei *debris flow* non confinati.

Pendenza media del canale (°)	Comportamento della colata
$i > 3^\circ$	Deposizione
$3^\circ < i < 10^\circ$	Rallentamento del fronte e/o arresto
$10^\circ < i < 15^\circ$	Rallentamento - movimento
$i > 15^\circ$	Formazione e movimento

Secondo Takahashi (1983), la deposizione di una colata detritica canalizzata derivante da un brusco cambiamento di pendenza del canale può essere espressa dalla seguente relazione:

$$\frac{\tan(\theta_v)}{\tan(\theta_m)} < \frac{\tan(\vartheta)}{\tan(\varphi)} \quad [5]$$

In cui:

θ_v = pendenza di valle del canale (°)

θ_m = pendenza di monte del canale (°)

ϑ = angolo di attrito interno cinetico del detrito (°)

φ = angolo di attrito interno statico del detrito (°)

Lo sviluppo dei conoidi alluvionali sembra riflettere le caratteristiche reologiche che caratterizzano il flusso durante il processo di deposizione; un fluido viscoso, o fangoso, mostra generalmente un'alta mobilità e dà luogo a forme deposizionali piatte o arrotondate e lisce, mentre colate detritiche granulari, il cui comportamento è comandato dalla scabrezza e dall'attrito tra le particelle, formano depositi più pendenti e poco mobili.

La diminuzione della pendenza porta di solito all'arresto improvviso del fronte granulare e ad un conseguente aumento dell'altezza del deposito del corpo a monte (Ancey, 2009). L'altezza del fronte dei *debris flows* rappresenta una delle variabili più importanti nel determinare il suo comportamento; essa è proporzionale alla portata, ma si modifica dinamicamente lungo il percorso di deflusso in risposta ai cambiamenti della geometria della sezione trasversale. Improvvisi cambiamenti nella geometria del canale sono in grado sia di ridurre la profondità massima del flusso, sia di causarne la deposizione sulle sponde e una diminuzione dello sforzo di taglio sul fondo del canale, che potrebbe portare alla comparsa di depositi all'interno del canale stesso (Cannon, 1989).

2.1.3 MORFOLOGIA DEI DEPOSITI INTERESSATI DA EVENTI DI COLATE DETRITICHE

I conoidi alluvionali sono creati dall'erosione, trasporto e deposizione dei sedimenti da parte del deflusso idrico, il quale opera un trasporto solido che può avvenire sotto diverse forme a seconda dell'energia della corrente idrica stessa e della quantità di sedimenti contenuti.

Posizione, forma e caratteristiche geometriche di un conoide alluvionale sono il risultato dell'equilibrio tra l'apporto di sedimenti al sistema fluviale, la capacità di trasporto del sistema, la capacità e l'influenza delle caratteristiche geologiche dei substrati sui modelli (pattern) di erosione e deposizione (Bull, 1977). Inoltre, ripetuti cambiamenti climatici regionali su larga scala possono profondamente influenzare questo equilibrio alterando l'apporto di sedimenti e il deflusso superficiale del bacino idrografico.

May e Gresswell (2004) hanno proposto una classificazione dei depositi originati da eventi di colata detritica in base alla posizione del sedimento rispetto sia al conoide, che al corso d'acqua principale. Sono state individuate cinque differenti tipologie di depositi, così descritti e rappresentati in Figura 8:

- A. depositi di sedimento fermati entro i confini della valle dell'affluente e che non sono giunti a contatto diretto con il conoide o con il corso d'acqua principale di fondovalle (Figura 8 - A);
- B. depositi arrestati perché hanno raggiunto un deposito esistente, o nella zona immediatamente a monte del deposito principale (< 100 m) che era stato riempito dai sedimenti (Figura 8 - B);
- depositi lobati, con uno o più lobi, che tagliano un percorso attraverso il conoide e dove solo una parte del materiale raggiunge il canale principale (Figura 8 - C);
 - depositi che percorrono per intero la superficie del conoide esistente e arrivano al corso d'acqua principale scaricando la maggior parte della massa trasportata (Figura 8 - D);
 - depositi che non hanno alcuna influenza sulle caratteristiche del conoide ma formano un ostruzione di detriti nel canale principale (Figura 8 - E).

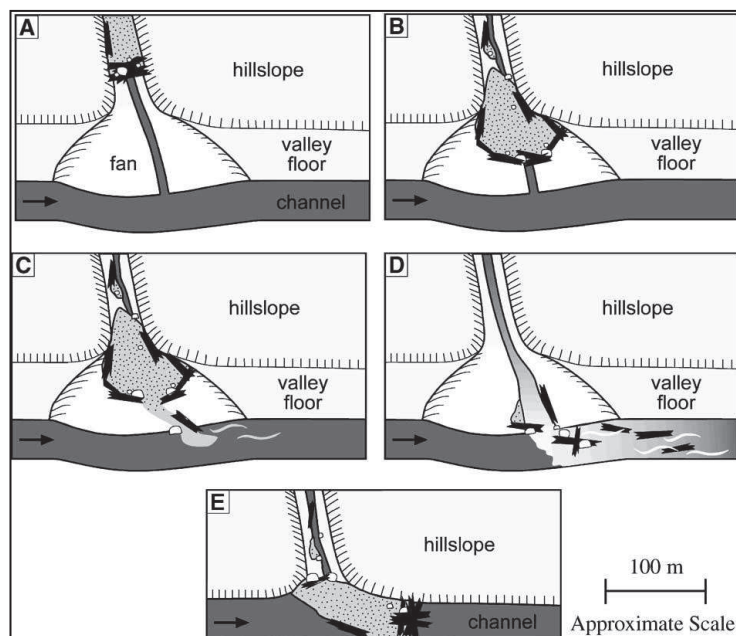


Figura 8 - Tipologie di depositi delle colate detritiche (May e Gresswell, 2004)

Le forme del deposito prodotto durante l'arresto di un *debris flow* possono essere molto diverse a seconda delle caratteristiche dei detriti, del conoide, delle caratteristiche dell'asta torrentizia e della presenza di ostacoli. Le principali forme di deposito, descritte da Van Dine (1996) possono essere classificate in tre grandi categorie quali:

- lobi terminali o *debris sheet* o *lobes*: depositi di forma lobata, composti da detrito di granulometria fortemente eterogenea. Questi depositi si osservano solitamente sui conoidi alluvionali, ma possono presentarsi anche in forma di lobi laterali ai lati del canale di scorrimento e, a seconda della litologia del bacino possono contenere massi di dimensioni diverse. Anche nei lobi terminali la reologia è determinante ai fini della loro conformazione

geometrica e granulometrica: per colate detritiche fangose si rilevano lobi di forma ben definita, caratterizzati da una terminazione frontale molto brusca e ricchi di matrice fine; per colate detritiche granulari si evidenziano depositi di forma meno regolare rispetto a quelli delle colate a matrice fangosa con presenza di grossi massi e matrice prevalentemente sabbiosa (Figura 9 – A);

- deposito in alveo o *debris plug*: i sedimenti trasportati, a seconda del grado di occlusione (parziale o totale) della sezione si depositano in maniera differente: con occlusione parziale i depositi vengono accumulati sul fondo o a ridosso delle sponde (Figura 9 – B₁); quando l'occlusione è totale i depositi formano un lobo confinato che causa l'aumento del fronte del flusso e la conseguente avulsione del *debris flow* (Figura 9 – B₂);

- Argini laterali o *debris flow levees*: depositi la cui formazione è riconducibile ad un debordamento laterale del fronte della colata, caratterizzato da profondità di flusso maggiori rispetto alla restante parte. Tali depositi di colata detritica in forma di argini laterali si trovano spesso lungo il corso dei torrenti all'interno del bacino e nella parte superiore dei conoidi alluvionali e sono caratterizzati dalla presenza dei clasti di maggiori dimensioni nella loro parte superiore.

Se la colata detritica è caratterizzata da una matrice fangosa tali depositi sono caratterizzati da una sommità arrotondata, ricchi di materiale fine all'interno dei quali si può rilevare il materiale grossolano sospeso nella parte sommitale. Per colate granulari si registra una grandissima abbondanza di materiale grossolano (ciottoli e massi) e scarsità di componente fine; in tali depositi il profilo trasversale degli argini laterali si presenta irregolare, con sezioni approssimativamente triangolari. Infine, per colate detritiche "dolimitiche" si rilevano argini laterali ricchi di materiale fine (ghiaia e sabbia) le cui sommità sono arrotondate o appiattite; talvolta si osservano anche terrazzi alluvionali conseguenti all'erosione dei depositi nella fase di esaurimento dell'evento. (Figura 9 – C).

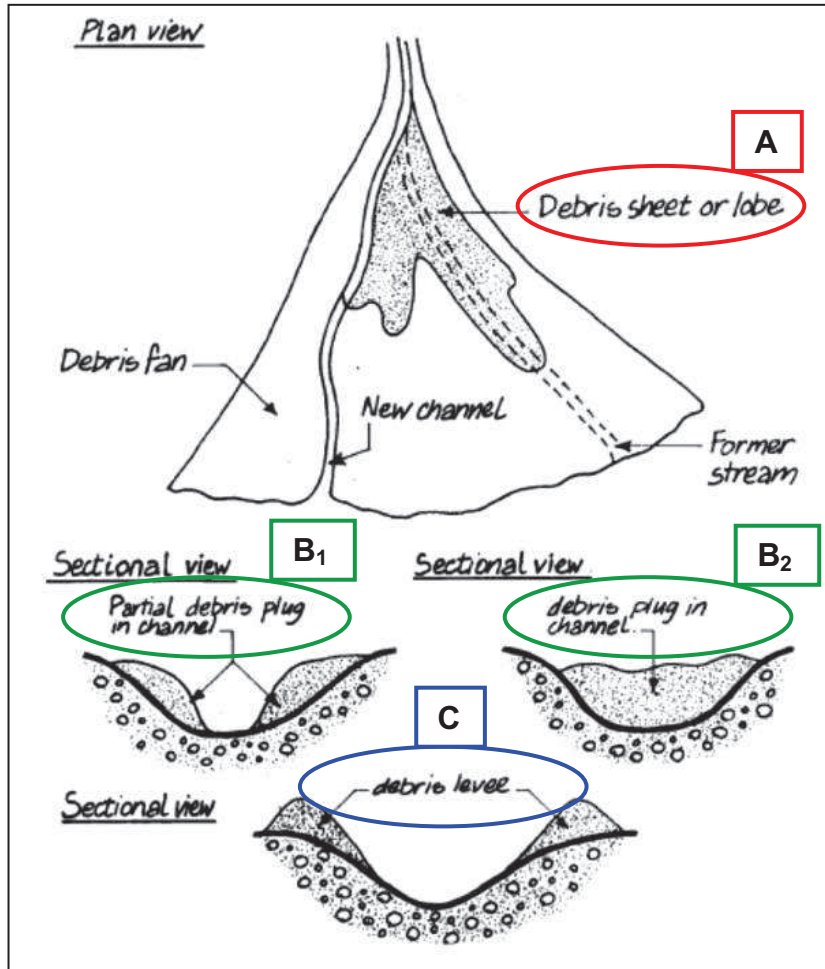


Figura 9 - Forme di deposito delle colate detritiche (VanDine, 1996).

2.2 RUOLO DEI BOSCHI NELLA DIFESA DAI FENOMENI DA COLATA DETRITICA

Gli ecosistemi forestali possono esercitare un ruolo importante nel prevenire e mitigare i pericoli naturali (Cammeraat et al., 2005; Bischetti et al., 2010), e quindi nella salvaguardia degli insediamenti umani, nella difesa del territorio agro-silvo-pastorale e più in generale nella conservazione dell'ambiente. Infatti, da sempre l'uomo attribuisce alle foreste un'importante funzione protettiva contro i fenomeni naturali considerati in alcuni casi "minacciosi e catastrofici". Questa funzione è svolta con diverse modalità ed è indirizzata a diversi aspetti e componenti sia dell'ecosistema forestale, sia delle attività e degli interessi dell'uomo.

La prima modalità di protezione (**funzione di protezione indiretta**) viene svolta dalla foresta nei confronti della conservazione del suolo dall'erosione diffusa, per impatto delle gocce d'acqua al suolo o incanalata, ad opera della forza azione erosiva dell'acqua che scorre attraverso vie preferenziali di deflusso. Questa è svolta da tutti i popolamenti forestali, ma è più o meno importante in funzione di giacitura, pendenza, morfologia e condizioni geo-pedologiche.

La seconda modalità di protezione (**funzione di protezione diretta**) è quella che la foresta svolge nei confronti dei pericoli naturali quali valanghe, caduta massi, scivolamenti superficiali e colate detritiche agendo sia impedendo il verificarsi dell'evento sia mitigandone l'effetto.

In assenza dell'uomo i pericoli naturali possono essere considerati normali fattori di disturbo che agiscono favorendo la naturale successione forestale o cambiando processi e dinamiche dell'ecosistema. Essenziale al fine di attribuire alle foreste un ruolo di "protezione diretta" è la presenza di infrastrutture o insediamenti antropici nei confronti delle quali la foresta agisce proteggendo direttamente l'uomo, le sue attività e i suoi interessi.

La "funzione di protezione diretta" si compone quindi di tre elementi: (1) un pericolo naturale; (2) un popolamento forestale in grado di impedire il verificarsi del pericolo naturale o di mitigarne l'intensità e di conseguenza gli effetti; (3) la presenza dell'uomo (insediamenti, attività economiche e vie di comunicazione).

Al contrario della protezione generica, che è assolta dalla foresta solo ed esclusivamente con la sua presenza (ma può variare con il grado di copertura degli strati arboreo, arbustivo ed erbaceo), la protezione diretta può essere svolta efficacemente solo da

popolamenti forestali aventi determinate caratteristiche (composizione, densità, stratificazione, tessitura) in funzione dei pericoli naturali presenti e il mantenimento, efficace e sostenibile della protezione diretta è possibile solo attraverso l'applicazione di trattamenti selvicolturali continui e specifici per un determinato tipo di disturbo.

2.2.1 DIFESA DAI FENOMENI DI COLATE DETRITICHE

“Gli alberi forestali sul conoide alluvionale svolgono un ruolo importante nella prevenzione delle colate detritiche e fangose. Per ritardare i flussi e proteggere le infrastrutture presenti sui conoidi alluvionali, è necessaria una completa conoscenza delle interazioni tra i flussi e gli alberi della foresta”(Hashimoto e Park, 2003).

Analizzando in dettaglio il ruolo della vegetazione nei confronti dei fenomeni di colata detritica si possono individuare tre aree nelle quali il bosco svolge la sua funzione protettiva (Bischetti et. al. 2010):

- Protezione nella **zona di innesco** grazie all'effetto di regimazione delle piogge intense che possono innescare le colate: la profondità di suolo occupata dall'apparato radicale e la densità delle radici formano un reticolo di pori finemente ramificati che permettono una grande permeabilità del suolo e al tempo stesso l'ancoraggio dello strato radicato al substrato. Importante è la diffusione delle foreste sull'intera superficie del bacino e quindi gli effetti sull'idrologia complessiva del torrente. Il bosco e la vegetazione presente lungo gli impluvi e le fasce dei corsi d'acqua riduce drasticamente la capacità d'alimentazione di materiali solidi, favorendo la stabilità superficiale del versante e delle sponde.
- Protezione nella **zona di trasporto** della colata dove il bosco garantisce la stabilità delle sponde degli impluvi e riduce il materiale che potenzialmente potrebbe alimentare la colata durante il suo passaggio. E' opportuno che in queste aree siano presenti individui sani e ancorati adeguatamente al suolo perché, in caso contrario sradicandosi alimenterebbero ulteriormente il volume della colata insieme a grandi quantità di materiale movimentabile;
- Protezione nella **zona di arresto** della colata in cui la foresta svolge un ruolo attivo dissipando una grande quantità di energia della colata riducendone la velocità, trattenendo selettivamente la colata e arrestando il flusso.

2.2.2 SELVICOLTURA NELLE FORESTE DI PROTEZIONE DA COLATE DETRITICHE

Affinché un popolamento forestale sia in grado di garantire una funzione di protezione diretta è necessario che possieda adeguate caratteristiche di composizione, densità, stratificazione e tessitura in funzione del pericolo naturale insistente.

Nel caso specifico delle colate detritiche, basandosi sulle indicazioni del manuale della **Regione Valle d'Aosta e Regione Piemonte (2006)** relativo alle esperienze ed indirizzi gestionali, per svolgere adeguatamente la funzione di protezione, nella foresta in esame si valutano “distribuzione orizzontale” e “distribuzione verticale”.

- Distribuzione orizzontale: regolare e caratterizzata da un'elevata densità, per svolgere l'importante funzione di trattenuta ed intercettazione delle acque di precipitazione che, se di notevole intensità possono essere la causa per l'innescio del fenomeno.
- Distribuzione verticale: pluristratificata in quanto, un popolamento disetaneo garantisce una completa presenza nei vari orizzonti di suolo delle radici aumentando sia la porosità che il consolidamento generale del soprasuolo.

La struttura ideale per le foreste impiegate per tale protezione è quindi **pluristratificata su piccole superfici, con elevato grado di copertura e una omogenea distribuzione degli alberi nello spazio** (Tabella 3).

Tabella 3 - Tabella riportante caratteristiche minime ed ideali relative alle foreste di protezione

Zone	Parametri		Esigenze minime	Esigenze ideali
Zona di scorrimento	Composizione		Su suoli <i>compatti e pesanti</i> favorire le specie pioniere a radicazione profonda; <i>latifoglie</i> : frassino, olmo, pioppo tremolo, ontani; <i>conifere</i> : abete bianco, pino silvestre. Nelle foreste di transizione occorre tendere verso la mescolanza di specie adatte alla stazione più mesofila.	
	Densità	N° piante/ha	Indifferente purché sia rispettata la % di copertura	
		% di copertura	≥ 40%	≥ 60%
	Struttura	N° strati	Popolamento pluristratificato	
		Aperture	< 20 m e superficie < 600 m ² . In presenza di rinnovazione affermata < 25 m e superficie < 1.200 m ²	< 15 m e superficie < 400 m ² . In presenza di rinnovazione affermata < 20 m e superficie < 800 m ²
Elementi di stabilità	Ancoraggio	Assenza di alberi di diametro grande (> 47,5 cm) o potenzialmente instabili per azione del vento; > 80% di alberi con buona radicazione evidente	Assenza di alberi di diametro grande (> 47,5 cm) o potenzialmente instabili per azione del vento; > 90% di alberi con buona radicazione evidente	
Zona di deposito	Densità	% di copertura	≥ 30%	≥ 50%

2.2.3 TECNICHE SELVICOLTURALI NELLE FORESTE DI PROTEZIONE

La gestione dei popolamenti di protezione comporta una particolare responsabilità del selvicoltore, in quanto spesso sono oggetto della protezione vite umane o comunque beni il cui valore è ben superiore a quello del legname ottenibile. Al tecnico forestale spetta dunque il compito di evidenziare il contributo potenziale della foresta, definire le misure adeguate per incrementarlo e, ove necessario ricorrere a manufatti specifici complementari agli interventi selvicolturali al fine di garantire una difesa completa e duratura nel tempo.

Per quanto concerne le colate detritiche, le indicazioni di massima per gli interventi da eseguirsi nei boschi di protezione sono:

- allontanamento delle piante potenzialmente instabili lungo il reticolo idrografico principale e secondario in quanto, sia in seguito a fenomeni trasporto di massa che di trasporto liquido, provocherebbero possibili ostruzioni nelle sezioni di minore ampiezza

come ponti, anse e promontori rocciosi. Tali sbarramenti, nei casi più gravi possono provocare avulsioni o accumuli di materiale che potrebbero innescare nuove e più pericolose colate detritiche;

- effettuare tagli manutentivi della vegetazione lungo le sponde tenendo conto della loro conformazione e della stabilità del materiale geo-litologico superficiale, garantita dagli apparati radicali degli individui forestali che, approfondendosi nel suolo lo compattano e, con il passare del tempo lo proteggono dalle azioni erosive delle acque meteoriche (impatto e dilavamento);
- adottare “tagli selettivi” atti a favorire vegetazione stabile e flessibile (*Salix e Alnus*) e valutare attentamente la stabilità delle piante vetuste.

2.3 MODELLI NUMERICI UTILIZZATI PER LA SIMULAZIONE DELLE COLATE

In generale, le strategie di gestione del rischio correlato ai fenomeni naturali, possono essere definite solamente dopo aver condotto una dettagliata valutazione del rischio stesso, inteso come combinazione della pericolosità del fenomeno e della vulnerabilità degli elementi a rischio.

A supporto della zonazione della pericolosità sono stati sviluppati modelli fisico-matematici che hanno avuto un ampio sviluppo consentendo, nelle versioni più recenti, una dettagliata simulazione del comportamento delle colate detritiche, soprattutto nella fase di “rallentamento-trasporto” e “arresto-deposito”

Tali metodi prendono in considerazione la conservazione della massa totale della colata, del momento e dell’energia di un *debris flow* nel simulare la sua propagazione utilizzando modelli monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali (*O’Brien et al., 1993; Hungr, 1995; Iverson and Denlinger, 2001; McDougall and Hungr, 2003*) e, possono essere raggruppati nelle categorie dei modelli a volumi finiti e modelli a elementi finiti.

- **Modello a VOLUMI FINITI o FVM:** consiste nel discretizzare nello spazio le equazioni integrali di conservazione della massa e della quantità di moto. Il vantaggio di tale metodo consiste nella possibilità di definire una griglia di calcolo su cui poi definire i volumi di controllo utilizzati dal modello per la valutazione delle conservazioni sopracitate. Inoltre, discretizzando le informazioni per ogni elemento del dominio di calcolo, si assicura che le varie quantità in esame (massa, volume,

energia) siano conservate totalmente durante tutto il tempo simulato. Pertanto, se il volume totale viene suddiviso in n sotto-volumi, è possibile scrivere n leggi di conservazione per ciascun volume dell'elemento (Hirsch, 1988).

- **Modello a ELEMENTI FINITI o FEM:** è, molto probabilmente, il metodo maggiormente utilizzato per le simulazioni in campo idraulico. Tale metodo si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, di elementi di forma definita e dimensioni contenute e con attributi omogenei. La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti consiste nella suddivisione del dominio in una griglia (*mesh*) composta da primitive (elementi finiti) di forma triangolare o quadrilatera e nella valutazione delle caratteristiche in esame (portate, volumi, altezze) indipendenti per ogni elemento e svincolate da qualsiasi criterio di conservazione.

Considerando invece le “dimensioni” nello spazio, utilizzate per la simulazione degli eventi di colata detritica, i modelli possono essere divisi a loro volta in *monodimensionali* (1D) e *bidimensionali* (2D).

I primi (1D), modellando il comportamento del flusso trascurano le componenti di velocità e direzione e necessitano di una serie di dati in input quali volume totale di colata, quota della zona di distacco e morfologia del canale. I secondi invece (2D), implementati nei software FLO-2D, RIVERFLO-2D e RAMMS per citarne alcuni, modellano il comportamento del *debris flow* considerando molteplici variabili, proprie sia del fluido (sforzo tangenziale, viscosità, angolo di attrito interno, concentrazione volumetrica dei sedimenti) che del “contorno” (topografia, scabrezza, uso del suolo del dominio) al fine di ottenere una modellazione più accurata possibile.

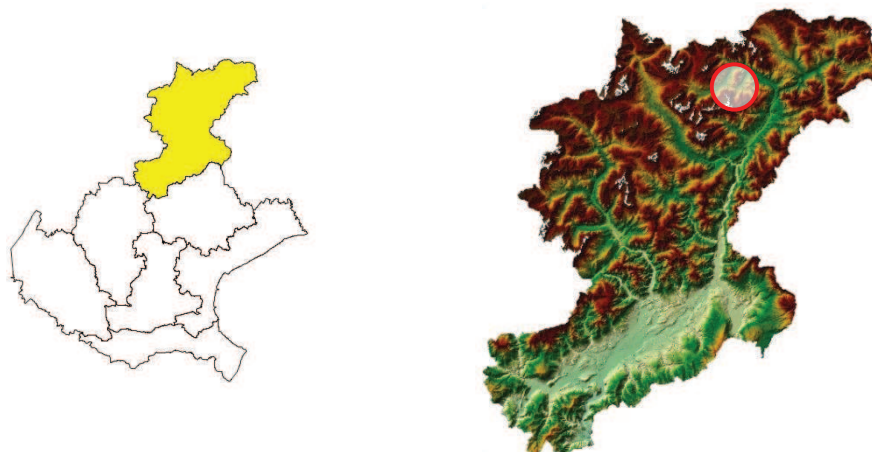
Secondo Iverson (1997), non esiste un modello univoco che possa simulare soddisfacentemente le diverse caratteristiche delle colate detritiche in quanto, fattori come la natura impulsiva del fenomeno, la variabilità composizionale e di contenuto d'acqua, la grande eterogeneità granulometrica e la diversa matrice geologica dei sedimenti complicano ulteriormente la situazione.

3 MATERIALI E METODI

3.1 AREA DI STUDIO

3.1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il bacino idrografico del torrente oggetto di studio, affluente in destra idrografica del torrente Ansiei, si estende nell'estrema parte settentrionale della Regione Veneto, in provincia di Belluno, più precisamente nel territorio comunale di Auronzo di Cadore. Il



bacino si trova, approssimativamente, a circa 10 km dal comune di Auronzo di Cadore in direzione nord-ovest verso l'abitato di Misurina (Figura 10), lungo la SR 48 "delle Dolomiti" in località "Cosderuoibe".



Figura 10 - Inquadramento territoriale del bacino oggetto di studio.

Il bacino è delimitato a nord dal Gruppo dei Cadini e dalla Croda dei Toni (3094 m s.l.m.), a sud dalla sommità della Croda Alta di Somprade (2646 m s.l.m.) e Cima dei Camosci (2639 m s.l.m.), a est dalla Croda Baion (2583 m s.l.m.) ed infine a ovest dal Monte Meduce, appartenente al Gruppo dal Sorapiss (2402 m s.l.m.).

3.1.2 MORFOLOGIA DEL BACINO

Il bacino rientra all'interno dei territori appartenenti al Gruppo delle Marmarole, le quali si presentano come una lunga catena di cime con andamento est-ovest che si sviluppano per oltre 13 km tra la Cima Bel Pra e il Pian dei Buoi; esposte a nord si elevano, con inclinazione moderata culminando in una serie di cime, torri e guglie rocciose caratterizzate da grandi strapiombi e pareti verticali o sub-verticali. In Figura 12, si può osservare una rappresentazione tridimensionale del bacino: in alto a destra la sommità della Croda Alta di Somprade e successivamente, scendendo verso valle il grande canale detritico da cui ha origine il torrente in analisi il quale, scendendo per una valle profondamente incisa tra i detriti confluisce nel torrente Ansiei. Ai piedi dei grandi massicci rocciosi sono ben visibili gli accumuli di detriti (ghiaioni) generati dai vari processi disgregativi naturali: tutto questo sedimento, facilmente movimentabile dagli eventi di pioggia, viene coinvolto nei processi di trasporto solido particolarmente intensi e trasportato a valle depositandosi nelle aree limitrofe al Torrente Ansiei.

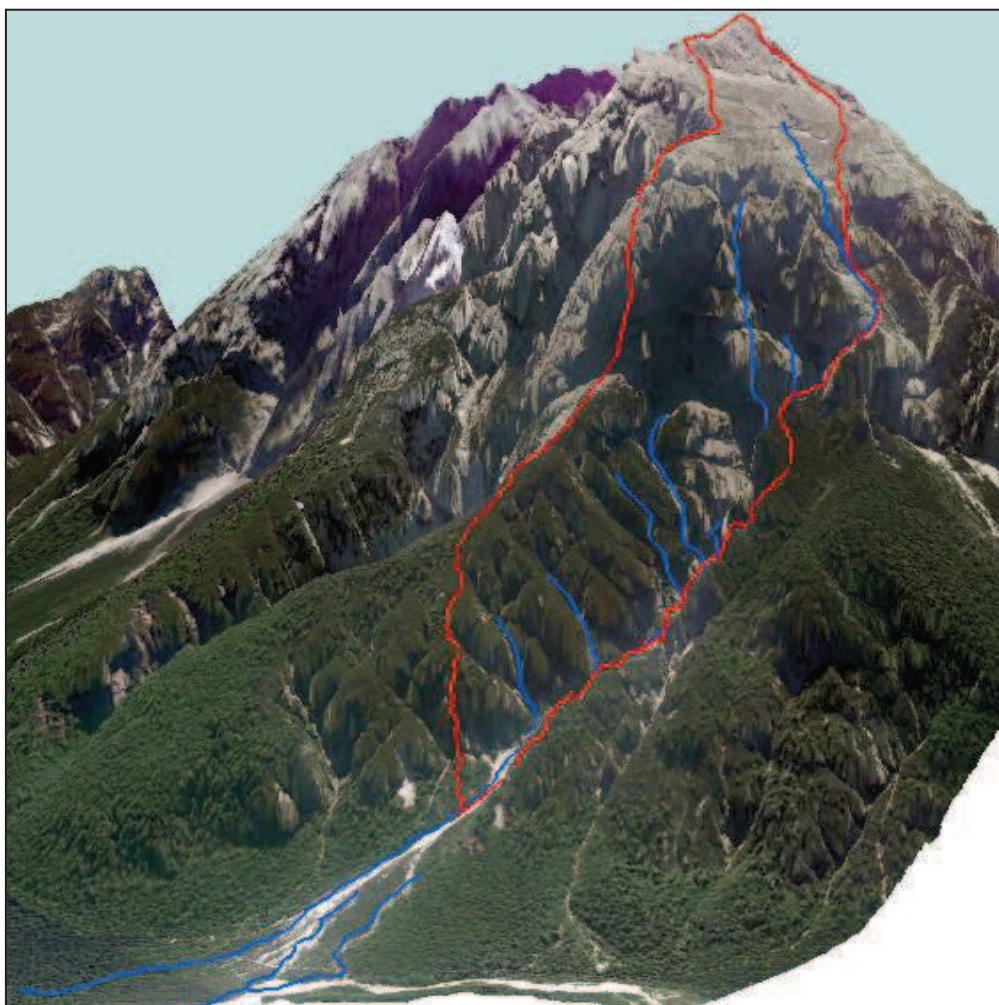


Figura 11 - Rappresentazione 3D dell'area oggetto di studio e del reticolo idrografico.

3.1.3 CARATTERISTICHE CLIMATICHE

Il clima che contraddistingue l'area di studio è di tipo alpino, caratterizzato da estati fresche e brevi ed inverni lunghi e rigidi con abbondanti nevicate; per il resto dell'anno il clima si presenta piuttosto umido e piovoso. Le precipitazioni cumulate annue si aggirano attorno a valori compresi tra 700 e 1000 mm con un valore medio di 750 mm. I valori massimi si registrano nei mesi estivi di giugno, luglio ed agosto con precipitazioni mensili variabili tra 100 e 110 mm, mentre i valori minimi si registrano nei mesi di gennaio e febbraio con valori compresi tra i 30 mm e 40 mm e sono prevalentemente di carattere solido (neve). Non sono rare le grandinate, soprattutto estive. Per quanto riguarda le temperature, le minime vengono registrate tra la fine di dicembre e i primi di gennaio con picchi attorno ai -15°C mentre le massime vengono registrate tra luglio ed agosto con picchi attorno ai $+25^{\circ}\text{C}$. Le stagioni intermedie, invece, sono generalmente piuttosto umide, piovose, fredde e molto ventilate. In Figura 12 viene riportato un diagramma delle temperature e delle precipitazioni medie mensili ottenute dall'analisi trentennale della stazione pluviometrica Arpav di Auronzo di Cadore.

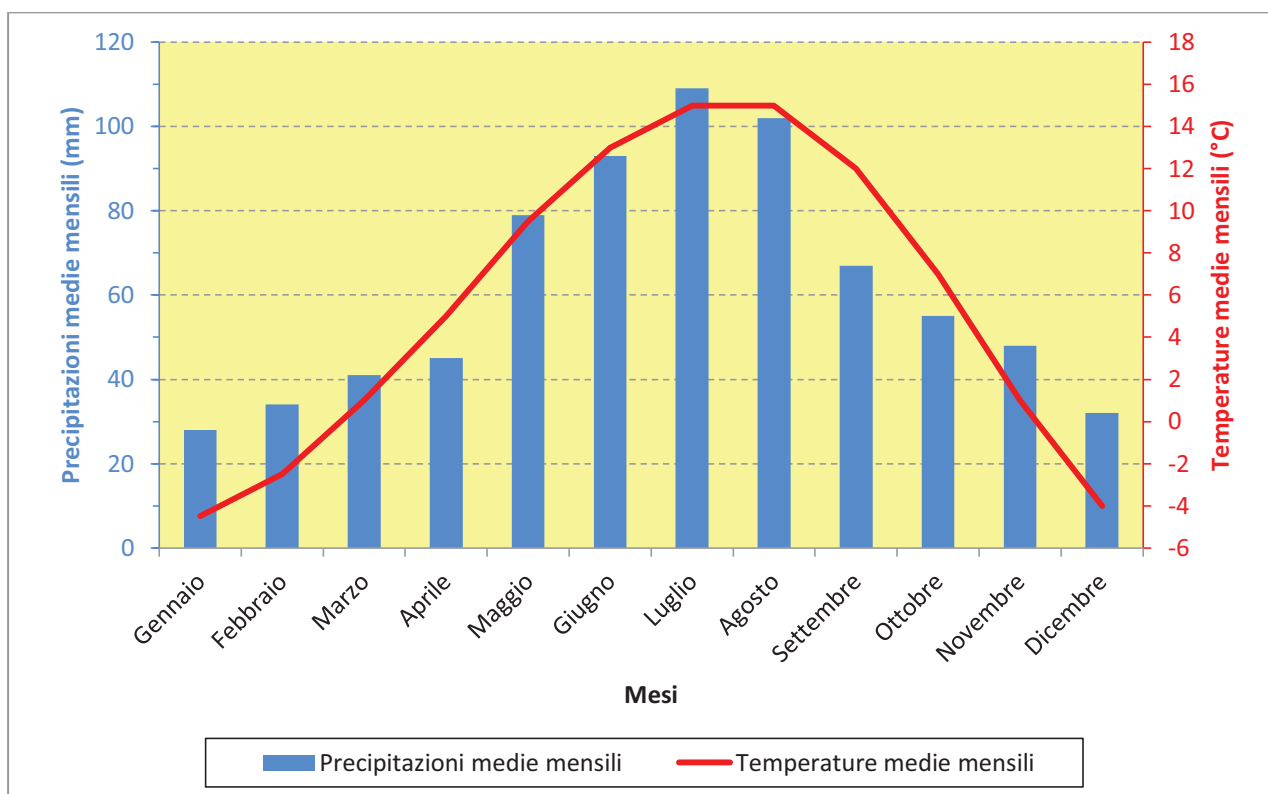


Figura 12 - Diagramma delle temperature e delle precipitazioni medie mensili relative all'area in studio.

Quest'area è caratterizzata da forti escursioni termiche giornaliere, con valori che possono raggiungere i $20-25^{\circ}\text{C}$, che si traducono in una notevole dinamicità nell'espansione e

contrazione delle rocce soggette, così, ad alterazioni disgregative marcate quali crioclastismo (o gelivazione) e termoclastismo. L'entità di queste azioni disgregative dipende essenzialmente da due componenti: acqua e temperatura. L'acqua, che percola tra le fessure rocciose, in conseguenza ai ripetuti cicli di gelo-disgelo, è soggetta al fenomeno del crioclastismo, cioè alla frantumazione di corpi rocciosi producendo frequenti cadute di detriti e crolli di roccia di varia dimensione. I detriti, così prodotti, formano abbondanti depositi di sedimento sciolto, facilmente erodibile e trasportabile dalle acque superficiali. Nella foto in Figura 13 sono ben visibili questi accumuli di falde detritiche ai piedi della Croda Alta di Somprade e lungo l'asta torrentizia.



Figura 13 - Accumuli detritici ai piedi della Croda Alta di Somprade.

Eventi meteorici di notevole intensità, frequenti in questa zona nei mesi estivi, sono in grado di mobilitare i detriti accumulatisi ai piedi dei versanti e trasportarli verso valle portando all'innescio di eventi di trasporto ad alta concentrazione solida, quali colate detritiche (*debris flow*), fonti di pericolo per infrastrutture e le vite umane (Panizza, 2007).

3.2 PARAMETRI MORFOMETRICI DEL BACINO

La descrizione morfometrica del bacino idrografico oggetto del presente lavoro è stata condotta in ambiente GIS (*Geographical Information System*). I dati della superficie del terreno georiferiti, sono stati rilasciati, previa concessione del Ministero dell'Ambiente in formato raster ed hanno permesso di ottenere il modello digitale del terreno (*Digital Terrain Model, DTM*).

Il DTM, con risoluzione di 1 x 1 metri (Figura 14), è stato utilizzato per estrarre la carta delle pendenze e delle esposizioni, e la curva ipsometrica del bacino idrografico e del corso d'acqua. Inoltre sono stati calcolati anche i principali indici morfometrici del bacino.

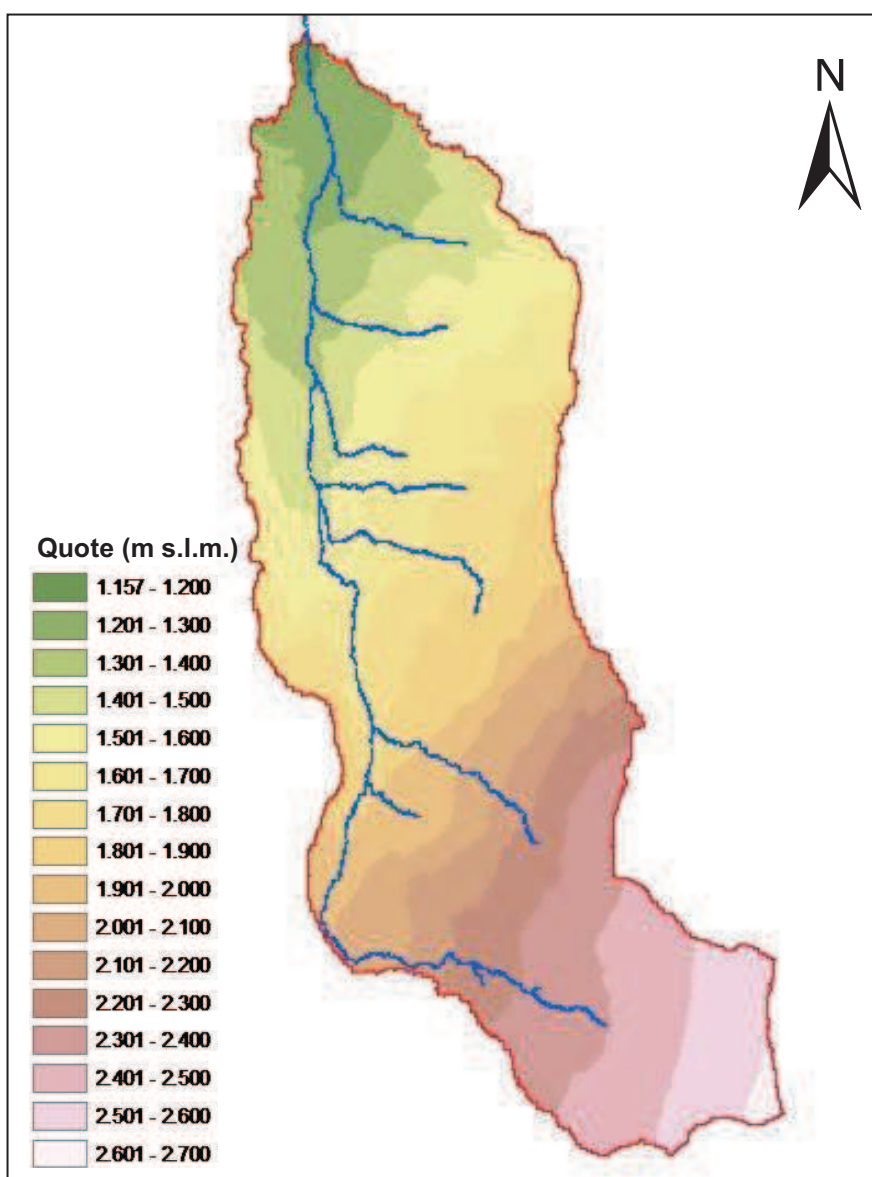


Figura 14 - DTM del bacino con rappresentazione del reticolo idrografico.

La sezione di chiusura del bacino, è stata posta immediatamente a monte della biforcazione del canale principale, a quota 1171.00 m s.l.m., che poi proseguendo verso valle interseca la strada silvo-pastorale che conduce alla località “Pralongo”.

3.2.1 PROPRIETA' LINEARI

Le proprietà lineari sono quelle che attengono al drenaggio e quindi ai caratteri della rete fluviale (lunghezza, numero di rami, ecc.) (Ferro, 2002).

Il collettore principale dell'affluente del Torrente Ansie in analisi, si sviluppa per una lunghezza complessiva (L) di circa 1605 m e, scendendo dalla Croda Alta di Somprade supera un dislivello complessivo di 1225.78 m (dalla quota sorgente di 2396.78 m s.l.m. a quota 1171.00 m s.l.m. riferita alla sezione di chiusura). Le caratteristiche plano-altimetriche del collettore principale sono riportate nel profilo longitudinale di Figura 15, ottenuto in seguito alle elaborazioni impiegando il DTM con celle 1 x 1 metro. La pendenza media, calcolata come rapporto tra il dislivello dei punti estremi del corso d'acqua e la sua lunghezza planimetrica, è risultata essere del 76.34 %; valore molto elevato che denota la grande possibilità di fenomeni franosi influenzati totalmente dall'azione della forza di gravità quali, in primis il rotolamento di massi e *debris flow*, in seguito agli eventi meteorici di notevole intensità che si abbattano ad alta quota nella stagione estiva.

. La densità di drenaggio, ovvero il rapporto tra la lunghezza di tutti i singoli rami del reticolo idrografico e l'area racchiusa dallo spartiacque del bacino, presenta valori molto alti nelle aree caratterizzate dalla presenza di terreni impermeabili perché, scorrendo su di esse il reticolo si presenta molto ramificato e, viceversa, molto contenuti per le aree permeabili caratterizzate da deflussi superficiali meno consistenti.

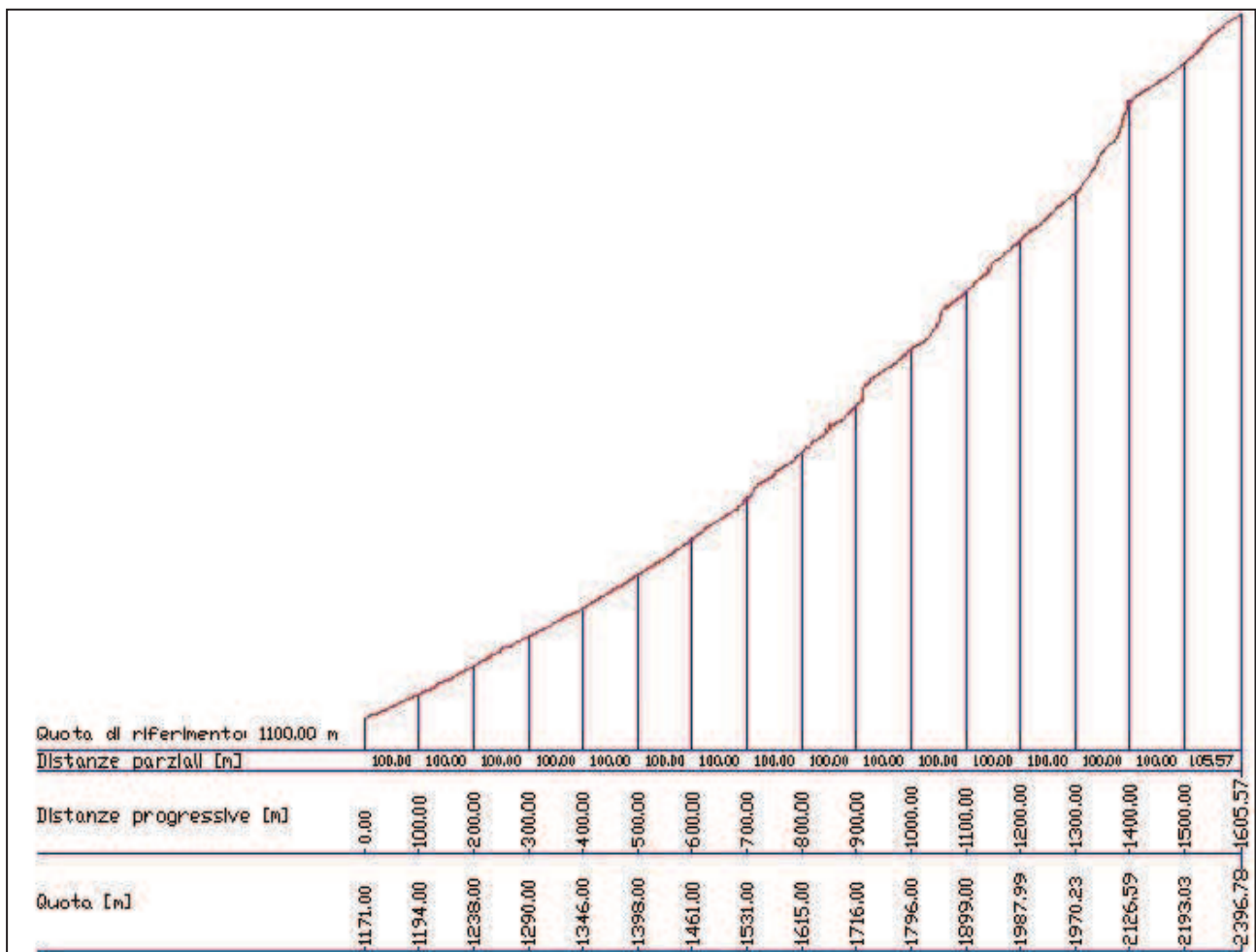


Figura 15 - Profilo longitudinale del collettore principale.

Un'ulteriore precisazione va condotta considerando la vegetazione, la quale influisce sensibilmente su questo indice: è stato dimostrato infatti che bacini con una poca copertura vegetale presentano alti valori di densità di drenaggio causa una maggiore attitudine del suolo ad assorbire l'acqua di precipitazione grazie soprattutto alle porosità create dagli apparati radicali che si sviluppano nel sottosuolo. Dall'analisi di tale parametro, per il bacino in questione è risultata pari a 10.4 km^{-1} , valore attendibile vista la scarsità di ramificazioni del reticolo di drenaggio.

A conferma di ciò si può analizzare anche l'indice di torrenzialità determinato da Puglisi che, assumendo un valore alto, circa 20, all'interno della superficie relativamente limitata del bacino in questione, indica una grande presenza di rami torrentizi appartenenti dunque al primo ordine ($n^{\circ}=9$) (Tabella 4).

Causa la poca, se non assente disponibilità di sedimento movimentabile e l'elevata pendenza lungo tutto il versante roccioso considerato, il corso d'acqua si presenta con poche diramazioni che si immettono nel corso d'acqua principale solamente nelle aree a pendenza più "dolce" in destra idrografica.

Tabella 4 - Proprietà lineari del bacino.

Parametri	Dimensioni	udm
Densità di drenaggio (Dr)	10.4	km ⁻¹
Coefficiente di torrenzialità (Dt, secondo Puglisi)	19.8	km ⁻²

in cui:

$$D_r = \text{Densità di drenaggio} = \frac{\sum L_u}{A} \quad D_t = \text{Indice di torrenzialità} = \frac{\sum N_1}{A}$$

3.2.2 PROPRIETA' AREALI

La forma planimetrica del bacino condiziona alcuni fenomeni idrologici che in esso si verificano come, per esempio, i tempi di trasferimento delle gocce di pioggia cadute sul bacino (Ferro, 2002). La superficie planimetrica (A) del bacino è risultata pari a 0.455 km², mentre il perimetro (P) è risultato pari a 4'940 m.

Tabella 5 - Proprietà areali del bacino.

PROPRIETÀ AREALI	VALORI
Indice di compattezza di Horton F_1	0.18
Indice di compattezza del bacino F_2 secondo Gravellius	2.06
Fattore di forma F_3	2.12

in cui:

$$F_1 = \frac{A}{L^2} \quad F_2 = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}} \quad F_3 = \frac{0.89 \times L}{\sqrt{A}}$$

Premesso che la risposta idrologica del bacino idrografico sia direttamente connessa alla forma dello stesso si analizzano l'indice di compattezza del bacino valutato da Gravellius (F_2) e il coefficiente di compattezza di Horton (F_1). Da questi due indici si determina la particolarità del bacino di presentare una forma "ovale-allungata" con conseguenti risposte idrologiche intese in termini di tempo, rapide provenienti dai versanti, vista la limitata

espansione laterale del bacino e la stretta vicinanza al reticolo idrografico e, una risposta piuttosto lunga relativa all'asta principale del corso d'acqua che a causa dell'elevata lunghezza (1605 m) necessita di un arco temporale elevato per condurre il singolo "elemento idrico" alla sezione di chiusura.

Si riporta in Tabella 6 un quadro riassuntivo dei principali parametri morfometrici del bacino e del collettore oggetto di studio.

Considerando l'indice di Melton, parametro essenziale per identificare l'origine del conoide, dall'equazione n.6 è risultato pari a 2.19 confermando che il conoide del bacino in esame è stato generato e conformato da un passato evento di *debris flow*.

Tabella 6 - Quadro riassuntivo dei parametri morfometrici del bacino.

PARAMETRI MORFOMETRICI PRINCIPALI	
Superficie planimetrica A (km ²)	0.455
Perimetro P (m)	4940.00
Quota massima h _{max} (m s.l.m.)	2646.49
Quota della sezione di chiusura h _o (m s.l.m.)	1171.00
Quota media h _m (m s.l.m.)	1852.46
Rilievo del bacino: h _{max} - h _o (m)	1475.49
Esposizione media (°)	245
Lunghezza del collettore principale L (m)	1605.57
Pendenza media del collettore principale (%)	76.34
Rilievo del collettore principale: h _{sorgente} - h _o (m)	1225.78
Pendenza media del bacino i _m (°)	49.93
Indice di compattezza F ₁	0.18
Coefficiente di forma di Gravelius F ₂	2.06
Fattore di forma F ₃	2.12
Indice di Melton	2.19
Densità di drenaggio (km ⁻¹)	10.4
Coefficiente di torrenzialità (km ⁻²)	19.8

Dopo aver analizzato dal punto di vista morfometrico i parametri morfometrici del bacino è opportuna, per una completa descrizione dello stesso, l'analisi delle pendenze ed esposizioni del bacino idrografico in studio.

La pendenza dei versanti riveste un ruolo fondamentale nella formazione e nella dinamica dei deflussi in quanto quest'ultimi risultano maggiormente accelerati nelle zone caratterizzate da alti valori di acclività. Tale accelerazione si traduce in un grande aumento dei fenomeni erosivi causati dall'azione degradativa del deflusso superficiale, responsabile di dissesti e di ulteriore instabilità sia dei depositi detritici, sia dei terreni di copertura.

A partire dal modello DTM del terreno è stato ricavato il file raster delle pendenze (Figura 16) per il bacino analizzato. Emerge che le zone caratterizzate dai valori maggiori di pendenza sono localizzate nella parte sud-est del bacino e fanno riferimento al versante esposto ad ovest appartenente alla Croda Alta di Somprade che, scendendo verso valle dà origine a pareti sub-verticali quasi strapiombanti, con valori di pendenza superiori agli 80°. Le aree caratterizzate da minore acclività si rilevano nella parte più sud-est del bacino, coperta per lo più da pascoli sporadici, e nella parte medio bassa caratterizzata da una fitta vegetazione di Pino mugo.

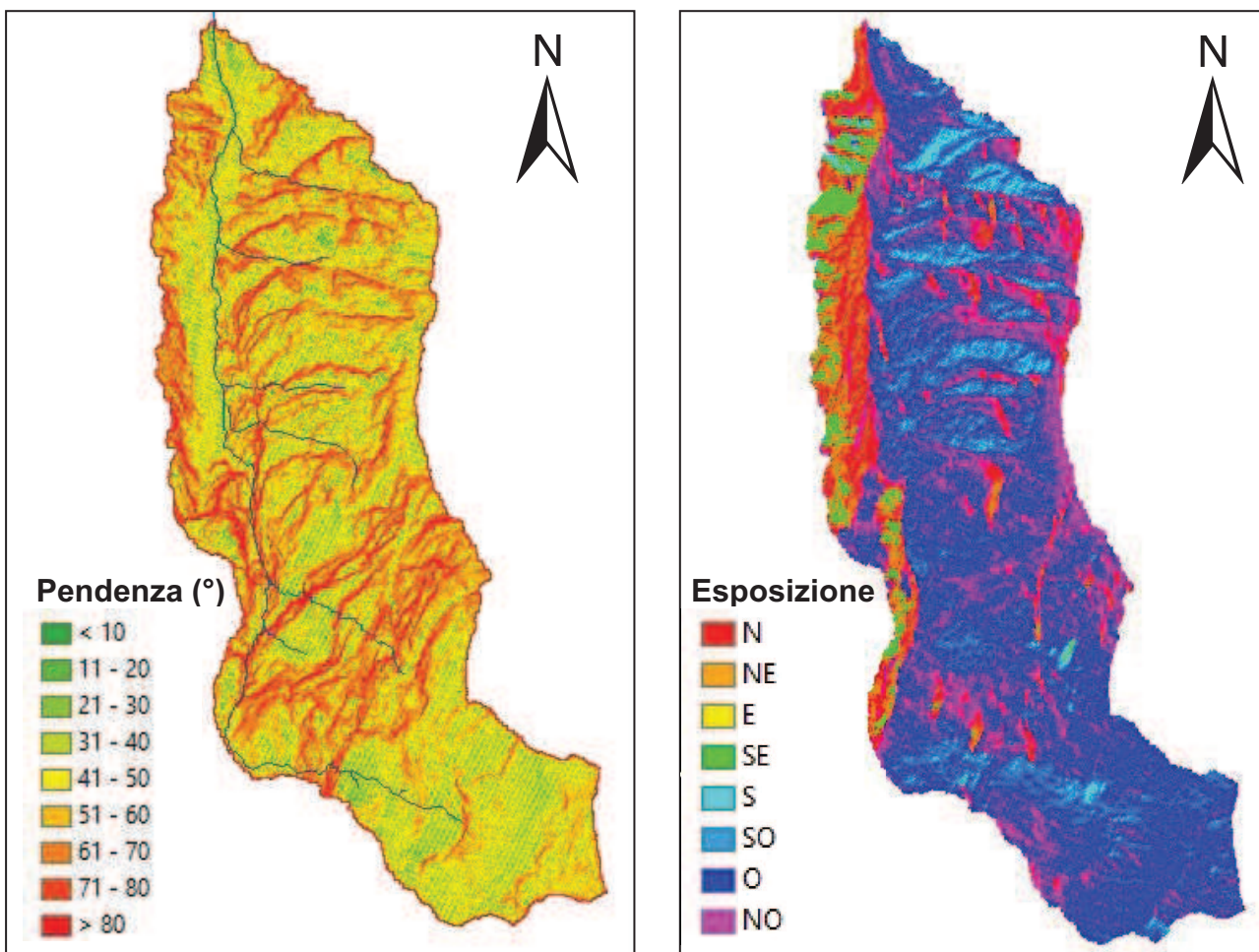


Figura 16 - Mappa raster delle pendenze e delle esposizioni.

Analizzando l'esposizione del bacino, si nota la maggior esposizione a Ovest, Nord-Ovest, caratterizzata da un basso o quasi assente valore di irraggiamento solare. Questo rende molto difficoltoso sia l'attecchimento che la nascita e crescita degli individui forestali in tali aree ed il conseguente aumento di erosione dell'acqua che, scorrendo in superfici prive di copertura vegetale e dunque caratterizzate da bassi valori di scabrezza (n di Manning), acquista velocità e forza erosiva.

3.2.3 PROPRIETA' DEL RILIEVO

Per completare l'analisi morfometrica è necessario stabilire la distribuzione delle aree elementari che compongono il bacino idrografico in relazione alla progressione delle curve di livello che delimitano suddette aree. In termini pratici occorre relazionare le informazioni areali alle dimensioni verticali caratteristiche del rilievo attraverso l'elaborazione dell'istogramma delle aree-quote e delle curve ipsometriche.

L'istogramma delle aree in funzione delle quote fornisce le informazioni relative alla distribuzione delle superfici appartenenti alle varie fasce altimetriche di ampiezza costante, con un intervallo altimetrico di 50 m. Dal grafico in Figura 17 si osserva una maggior superficie di aree appartenenti alle zone contraddistinte da bassi valori di acclività (vedi Figura 16) che si sviluppano tra le quote comprese tra i 1400 e i 1800 metri e tra i 2250 e i 2600 metri.

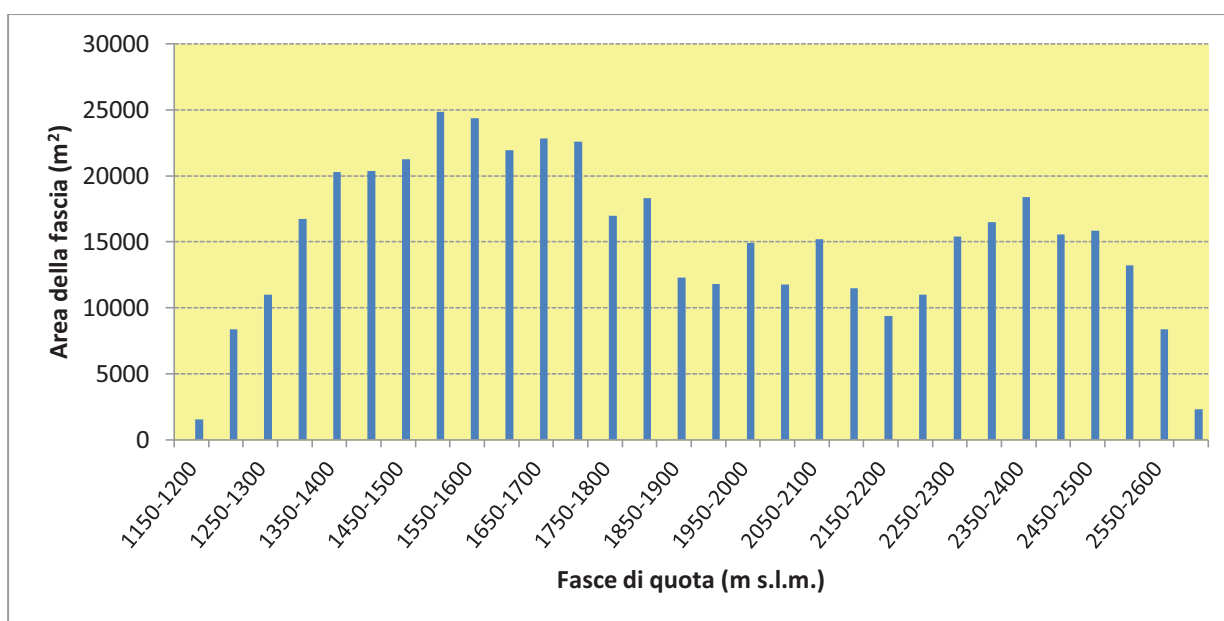


Figura 17 - Distribuzione areale per fasce di quota del bacino.

Altri parametri essenziali per la definizione delle caratteristiche morfometriche del bacino sono le *curve ipsometriche dimensionali e adimensionali*.

Secondo quanto stabilito da Ferro, 2002, l'analisi delle componenti ipsometriche consente di stimare lo stadio evolutivo del bacino idrografico classificato tra giovanile, maturo e senile. Da questa analisi, condotta su entrambe le curve ipsometriche (Figura 18 e Figura 19) si nota come il bacino sia ancora in una fase di transizione "giovanile-maturo", caratterizzato da una fase erosiva molto aggressiva ma con alcune aree in condizioni di

equilibrio le quali hanno “esaurito” la loro attitudine a innescare e incrementare fenomeni di trasporto.

Infine è essenziale calcolare l’altitudine media del bacino (linea rossa di Figura 18). L’altitudine media del bacino h_m , riferita al livello medio del mare, è ottenuta grazie alla media pesata delle quote riportata nell’equazione sottostante:

$$h_m = \frac{\sum h_i \times A_i}{A} \quad [6]$$

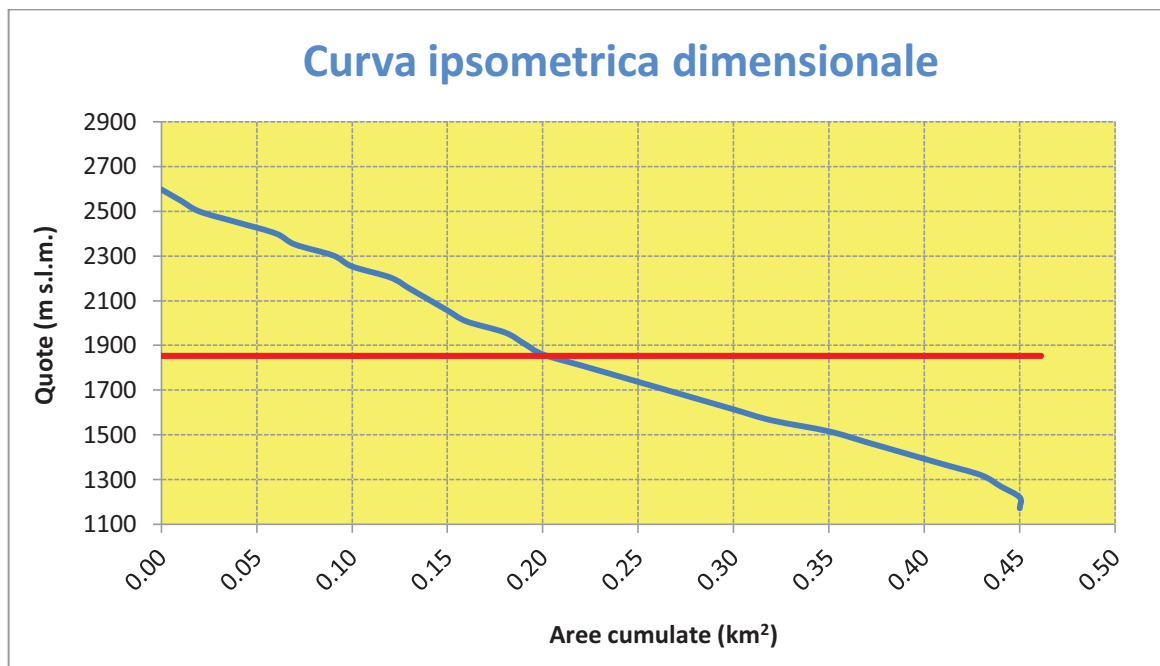


Figura 18 - Curva ipsometrica dimensionale del bacino (in rosso la quota media).

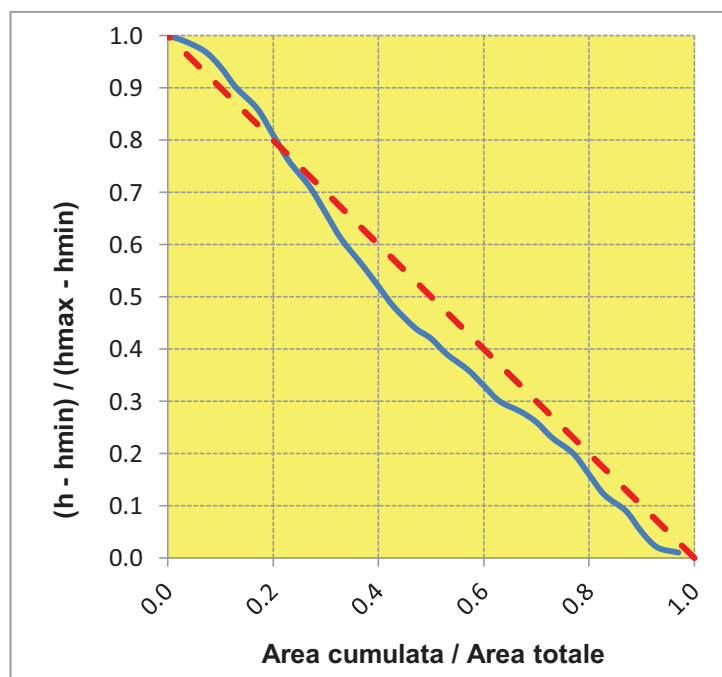


Figura 19 - Curva ipsometrica adimensionale del bacino (in rosso la bisettrice)

3.3 USO DEL SUOLO

L'analisi della copertura del suolo del bacino ha il duplice obiettivo di fornire informazioni prettamente qualitative, relative alle varie coperture presenti, e la definizione del parametro di scabrezza (n di Manning o K_s di Strickler). Quest'ultimo rappresenta un'informazione essenziale nella modellazione "afflussi-deflussi" che avviene all'interno di un bacino idrografico, permettendo di calcolare sia la quantità d'acqua che il tempo necessario perché questa transiti alla sezione di chiusura.

L'analisi della copertura del suolo è stata eseguita a partire dalla cartografia "Corine Land Cover", disponibile dal sito della Regione Veneto, verificandola ed integrandola con sopralluoghi in campo eseguiti nelle estati del 2013 e 2014.

Come si può notare dalla Figura 20, il bacino ha il classico aspetto degli alti bacini dolomitici, la cui copertura risulta essere composta principalmente da tre o quattro categorie d'uso ovvero rocce nude, ghiaioni, mughete e pascoli altimontani.

Le rocce, che coprono quasi il 40% del bacino, si estendono nelle zone di testata a partire dalla quota di circa 1700 m s.l.m. e sono rappresentate dalle pendici rocciose che salgono lungo il versante Nord-Ovest della Croda Alta di Somprade. Altro valore consistente di copertura spetta alle mughete (*Pinus mugus*), che coprendo poco meno del 40%, si

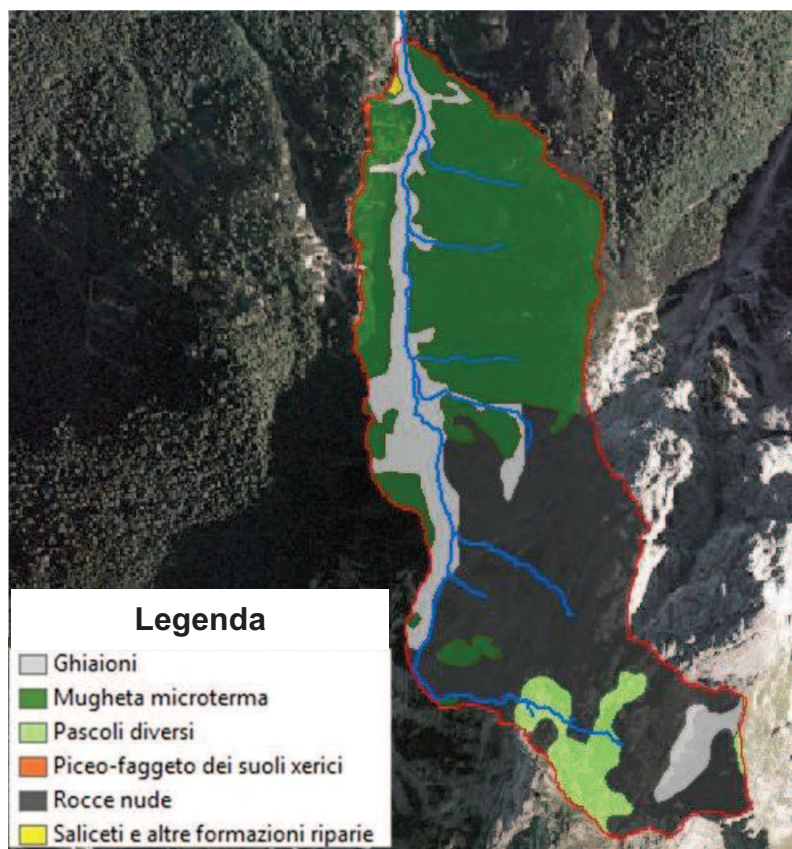


Figura 20 - Ortofoto del 2012 e carta d'uso del suolo, tagliata sul bacino (in rosso), e reticolo idrografico (in blu).

sviluppano in tutta la parte medio-bassa del bacino ed in particolar modo nelle aree prossime al torrente che scende dalla cima montuosa citata in precedenza; essendo una specie pioniera colonizzante soprattutto i suoli calcarei, questo tipo di vegetazione cresce e si sviluppa molto rapidamente anche negli ambienti ombrosi privi di insolazione diretta, come nel versante esposto a Nord del bacino oggetto di studio. Nelle aree sommitali, a partire da quota 2200 m s.l.m., le mughete lasciano spazio, causa molto probabilmente la presenza di luce diretta e ad un suolo meno profondo, all'affermazione di discrete superfici di pascoli altimontani che ricoprono circa il 5 % del bacino. Tutta la parte inferiore del bacino, fatta eccezione nell'area di pertinenza del canale principale, è ricoperta da una vegetazione di tipo montano all'interno della quale predominano formazioni di saliceti (*Salix spp.*) e piceo-faggete (*Picea abies* e *Fagus sylvatica*). Queste, crescendo ed espandendosi in terreni ricchi di umidità, sono indice, dal punto di vista geologico, della presenza di suoli poco profondi e poco drenati.

Con riferimento alla cartografia dell'uso del suolo del bacino è stato elaborato il grafico a "torta" (Figura 21) in cui vengono riportate le varie distribuzioni delle diverse tipologie di uso del suolo presenti.

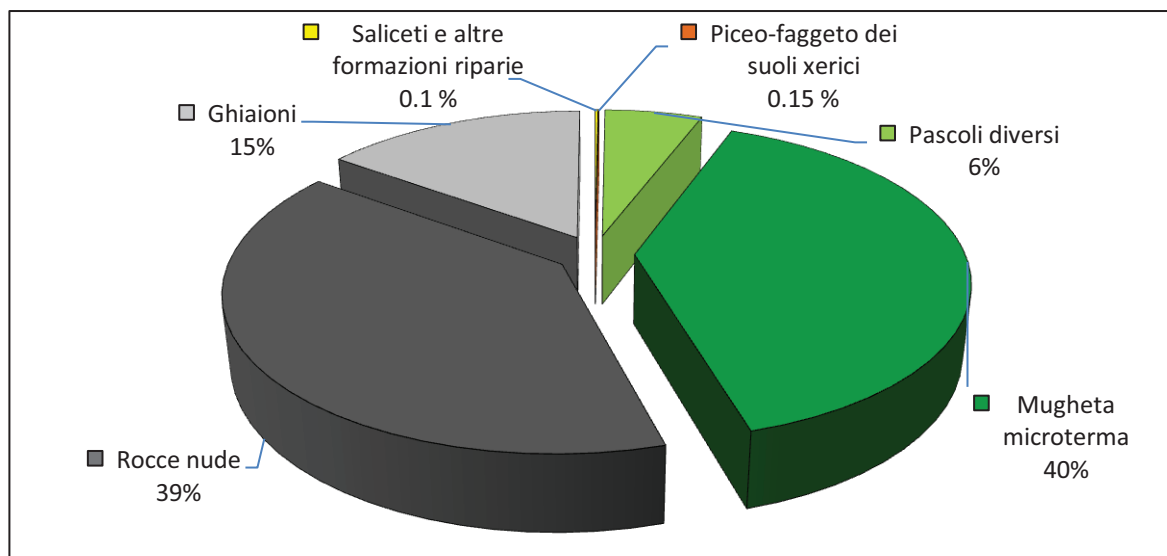


Figura 21 - Grafico con i valori percentuali secondo le categorie d'uso del suolo del bacino.

3.4 ASSETTO GEOLOGICO

Lo studio dell'assetto geologico del bacino risulta molto importante soprattutto per quanto concerne l'analisi reologica della colata detritica in quanto, a seconda delle diverse formazioni geo-litologiche presenti, i fenomeni di *debris flow* possono assumere comportamenti fortemente differenti, dipendenti dalla matrice rocciosa coinvolta in essi e dalla disponibilità più o meno elevata di sedimenti assumibili in carico.

Risalendo il collettore principale del bacino, dalla sezione di chiusura alla cima della Croda Alta di Somprade, è riconoscibile l'unica formazione litologica appartenente alla Dolomia Principale. Tale elemento tettonico presenta direzione est-ovest (cioè trasversale alla vallata che sale al Lago di Misurina) ed è complicata da faglie dirette a nord-sud che, frazionando l'ammasso roccioso della Croda Alta di Somprade, creano le condizioni ideali per:

- formazione dei canali che costituiscono vie preferenziali di accumulo e smaltimento delle acque meteoriche alla testata del bacino;
- crollo di ingenti volumi rocciosi che vengono inglobati nei depositi detritici, i quali possono essere assunti in carico e trasportati a valle da fenomeni di trasporto intensi quali colate detritiche.

Si descrivono in dettaglio i caratteri principali delle rocce e dei terreni affioranti presenti nel bacino oggetto di studio, suddividendoli in 2 categorie: Rocce del substrato e Terreni di copertura.

3.4.1 ROCCE DEL SUBSTRATO

- **Dolomia Principale** (*Dachsteinkalk und Dolomit* di HAUER, 1853; *Hauptdolomit* di GÜMBEL, 1857). Costituisce un esteso e potente piastrone presente su gran parte del territorio Sudalpino, caratterizzato da una grande omogeneità laterale di facies (prevalentemente peritidali), con spessore che può oscillare dai poco più di 200 m del Gruppo del Sella, passando agli 800 m del Gruppo delle Tofane e arrivando anche a circa 2000 m per le dolomie del bellunese. Tale formazione rocciosa forma le pareti di tutto il grande Gruppo delle Marmarole che si estende dai Cadini di Misurina fino al gruppo dell'Antelao e comprende quindi la cima della Croda Alta di Somprade. Si tratta di dolomie di colore grigio la cui stratificazione varia da decimetrica a metrica. Le pareti rocciose sono affette da periodici crolli di massi isolati o di grandi masse in blocco. Una caratteristica tipica della Dolomia Principale è la sua ciclicità, visibile osservando le pareti costituite da strati regolari in quanto, osservando da vicino ogni singolo strato, si può notare come esso sia a sua volta composto da due parti: una fittamente laminata e corrispondente a tappeti di alghe fossilizzate, l'altra più massiccia e formata da fango calcareo trasformato in roccia. Il ripetersi di questi cicli per circa una decina di milioni di anni, ha permesso l'accumularsi di un migliaio di metri di depositi che oggi formano le pareti rocciose dell'area oggetto di studio.



Figura 22 – Dolomia principale - Cima della Croda Alta di Somprade

3.4.2 TERRENI DI COPERTURA

Sono considerati “terreni di copertura” i depositi di origine eluviale, detritici e di frana e possono essere distinti in due tipologie, ovvero: “terreni di copertura **sciolta nuda**” e “terreni di copertura **sciolta vegetata**”.

- **Copertura sciolta nuda**

Costituita da detriti di pezzatura grossolana, ciottoli, ghiaia e sabbia che si depositano per gravità ai piedi delle pareti rocciose della Croda Alta di Somprade in seguito all’azione di disfacimento operata dai cicli gelo-disgelo, come già descritto al Paragrafo 3.1.3. L’assenza di una copertura vegetale, anche pioniera, indica una periodica attivazione dei processi di erosione e trasporto verso valle di questi materiali.

Per quanto riguarda l’area oggetto di studio, questo tipo di copertura è presente soprattutto lungo l’asta torrentizia che scende dalle parete rocciose sopra citate (Figura 23). Inoltre, dai rilievi di campo eseguiti, è emersa la presenza di numerosi massi “ciclopici” (Figura 24) con dimensioni dell’ordine di un centinaio di metri cubi che, se trasportati a valle potrebbero recare notevoli danni sia alla foresta che alla strada forestale sottostante.

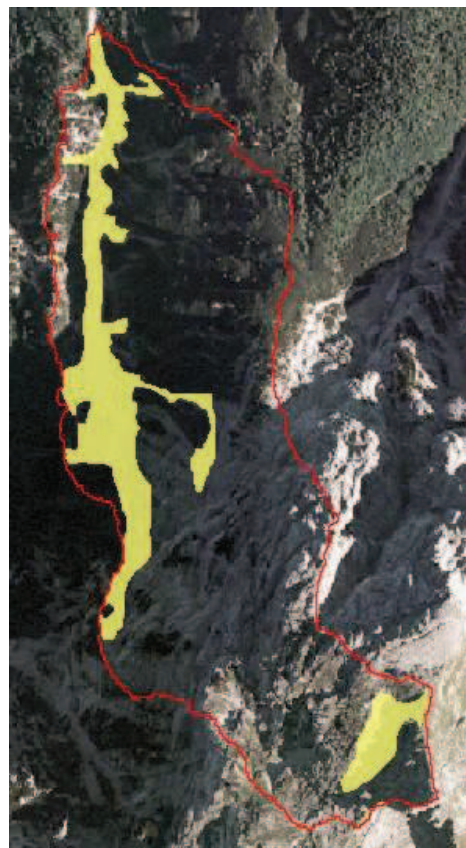


Figura 23 - Ortofoto con rappresentazione dei terreni di copertura “sciolta nuda”.



Figura 24 - Copertura sciolta "nuda" adiacente al collettore principale che scende dalla Croda di Somprade

- **Copertura sciolta vegetata**

Questa è costituita da materiali detritici di varia pezzatura che può spaziare dai blocchi, ciottoli fino alla ghiaia ma comunque di classe diametrica generalmente minore al precedente tipo di copertura. A differenza della precedente tipologia, da molto tempo questi depositi detritici non risultano più attivi ai fenomeni erosivi e di trasporto e pertanto presentano in superficie uno strato di suolo organico più o meno profondo ed una copertura vegetale che può essere erbacea ed arbustiva, soprattutto nelle zone altimetricamente più alte, dove predominano le formazioni delle mughete ed arborea, diffusa maggiormente nelle aree più pianeggianti e basali del bacino (Figura 25 e Figura 26), dove prevalgono foreste di Abete rosso insieme ad una cospicua presenza di Faggio e Pino silvestre.

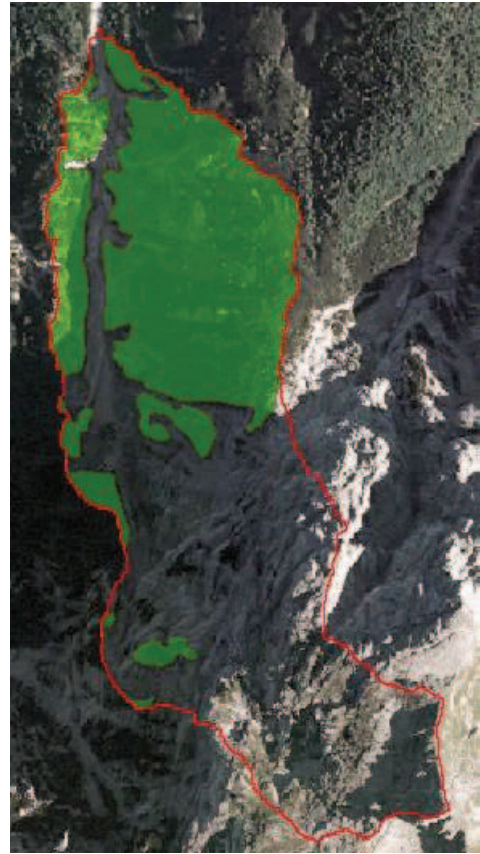


Figura 25 - Ortofoto con rappresentazione dei terreni di copertura "sciolta vegetata".



Figura 26 - Copertura sciolta "vegetata" diffusa nelle aree medio-basse del bacino

3.5 ANALISI DEL CONOIDE DEL BACINO

Il materiale detritico che precipita, o viene trasportato a valle, lungo un versante costituisce, alla base di esso, un deposito detto, a seconda della sua forma, *conoide* o *falda di detrito* (Panizza, 2007).

Le caratteristiche tipiche del conoide sono spesso condizionate dalle fasi di movimento e dalla successiva fase di deposizione del materiale detritico inglobato durante il trasporto. Velocemente si possono sintetizzare i fattori principali che condizionano il fenomeno deposizionale di un *debris flow*, responsabili dunque delle diverse conformazioni assunte dal deposito a “fine evento”: a) riduzione della pendenza del canale; b) ostacoli presenti in alveo; c) avulsione e seguente deposizione del materiale detritico; d) forte cambiamento di direzione dell'alveo.

Le forme del deposito prodotto durante l'arresto di un *debris flow* possono essere molto diverse in funzione delle caratteristiche dei detriti, dell'acclività dell'area di arresto, delle caratteristiche dell'asta torrentizia e della presenza di ostacoli e vegetazione.

3.5.1 DESCRIZIONE DEL CONOIDE DEL BACINO

Il deposito formatosi in seguito all'evento del 30 luglio 2012 (Figura 27), si estende lungo tutto il conoide alluvionale con una lunghezza massima (*runout distance*) di circa 520 m e un'espansione laterale (*spreading*) di circa 300 m. Dal punto di vista altimetrico si sviluppa approssimativamente tra la quota minima di 1025 m s.l.m., in prossimità della vegetazione perifluviale del Torrente Ansiei, e quota massima di 1171 m s.l.m., riferita alla sezione di chiusura del bacino posta in apice al conoide (Tabella 7).

Tabella 7 - Proprietà morfometrico-topografiche del conoide in studio.

PARAMETRI MORFOMETRICI DEL CONOIDE	
Superficie planimetrica A (m ²)	34 129.68
Perimetro P (m)	2 731.11
Quota massima h _{max} (m s.l.m.)	1171.00
Quota minima h _{min} (m s.l.m.)	1025.00
Rilievo del conoide: h _{max} - h _o (m)	146.00
Lunghezza del collettore in conoide L (m)	648.15
Pendenza media del collettore (%)	22.53
Pendenza media del conoide i _m (°)	14.65
Indice di Melton	2.19

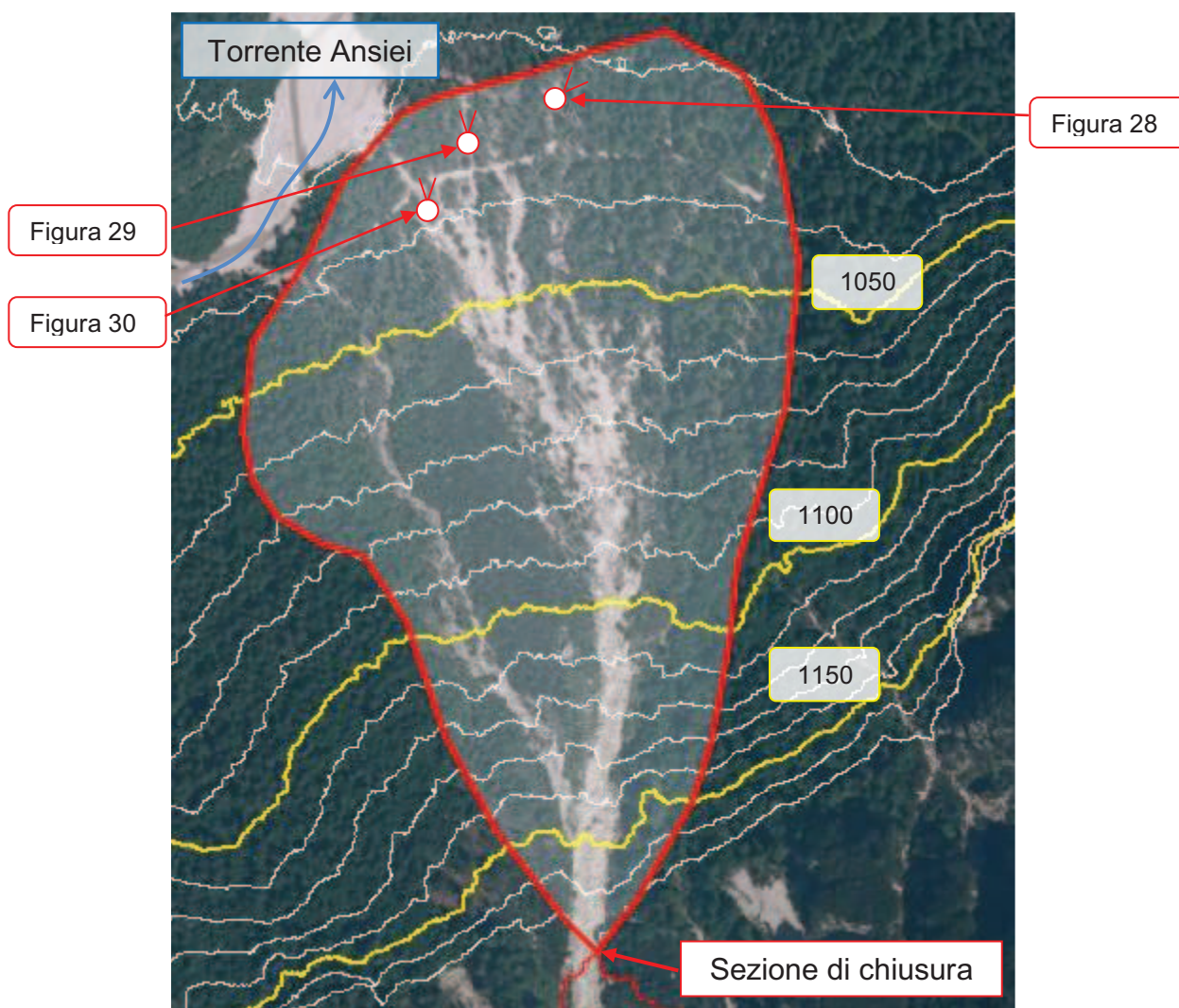


Figura 27 – Isolinee a 10 m del conoide del bacino con il deposito, originatosi in seguito all'evento analizzato.

Grazie ai rilievi di campo è stato possibile determinare con una maggior precisione il perimetro e l'area effettivamente occupata dal deposito. Come si osserva in Figura 28 sono ben distinguibili 3 depositi di forma lobata; uno grande e centrale limitrofo al collettore principale e due laterali, provocati dal debordamento e avulsione del flusso durante l'evento considerato. Questi, addentrandosi nella vegetazione circostante, hanno provocato la modifica della topografia dell'area mediante il parziale interrimento della vegetazione estesa nella parte medio-bassa del bacino idrografico, limitrofa sia al torrente principale che scende dalla Croda Alta di Somprade, che al Torrente Ansiei (Figura 28, Figura 29 e Figura 30). Questi depositi, oltre a determinare l'inevitabile aumento della quota del terreno, hanno un'importanza soprattutto ecologica in quanto, coprendo il suolo e riducendo il quantitativo sostanza organica e di irraggiamento solare, sono responsabili del significativo stato di deperimento degli individui forestali presenti, i quali appaiono

secchi, scortecciati, piegati e con chiome ingiallite e defogliate. Sono stati rilevati inoltre numerosi individui abbattuti, sia stroncati che sradicati, molto probabilmente ad opera del violento impatto del *debris flow*.



Figura 28–Foto scattata nella parte terminale del conoide, nei pressi della confluenza con il torrente Ansiei.



Figura 29 - Panoramica del conoide nelle aree sotto-copertura della parte bassa del bacino.



Figura 30 - Foto dei depositi a forma "lobata" nelle aree sotto-copertura della parte bassa del bacino.

3.5.2 DESCRIZIONE VEGETAZIONALE DEL CONOIDE

Per l'obiettivo specifico della tesi molto importante risulta l'analisi della componente vegetale del conoide in quanto diversi pattern di vegetazione (specie, densità, età, altezza) sono responsabili di differenti morfologie e caratteristiche relative alle dinamiche deposizionali nella fase conclusiva dell'evento di colata.

Come si può vedere in Figura 31, l'area occupata dal conoide del bacino rientra completamente all'interno della regione forestale definita "Mesalpica" (Del Favero, 2004) dell'arco alpino italiano. In questa regione prevalgono le formazioni tipiche dell'ambiente montano quali lariceti (*Larix spp.*), peccete (*Picea abies*), faggete (*Fagus spp.*) e pinete (*Pinus spp.*).

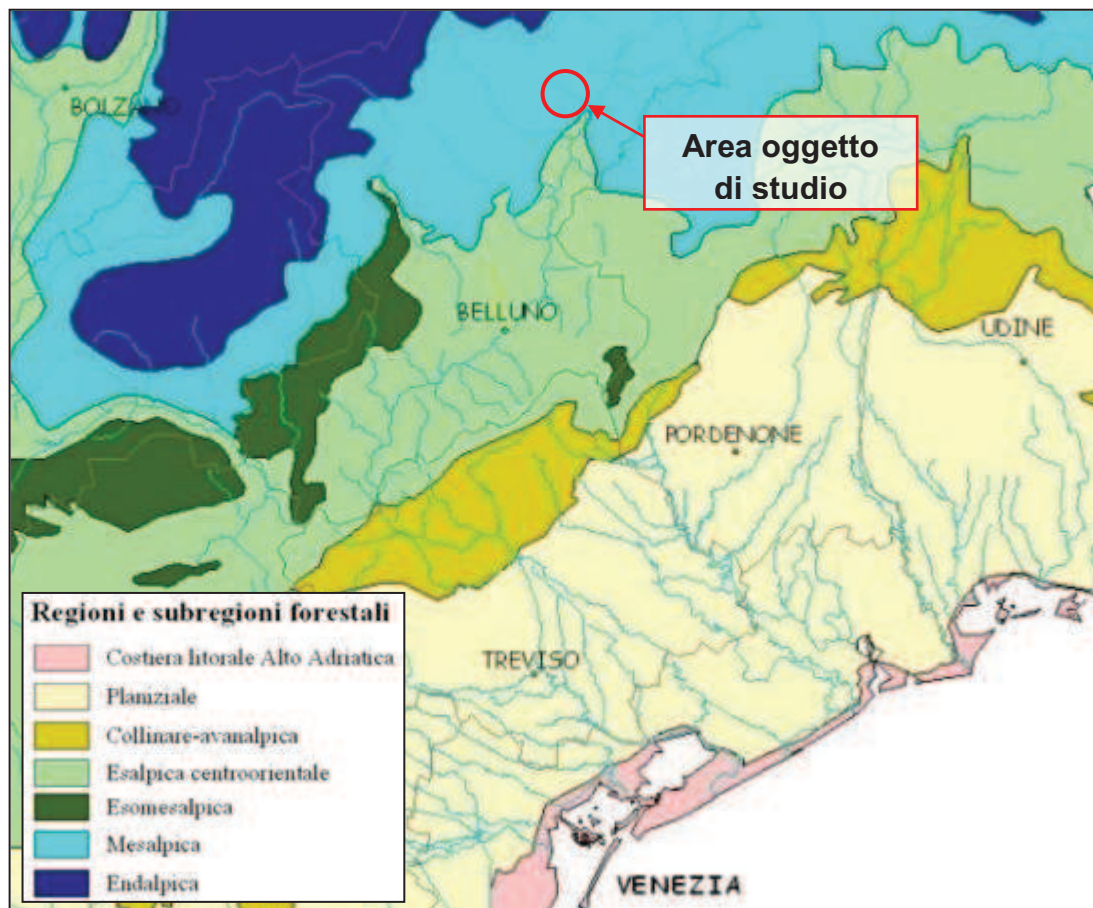


Figura 31 - Carta delle regioni forestali con indicazione dell'area di studio. (Del Favero 2004).

Nella specifica area di studio si riscontrano formazioni miste di abete rosso (*Picea abies*), abete bianco (*Abies alba*) e faggio (*Fagus sylvatica*) pertanto, secondo la classificazione di Del Favero, l'area in esame rientra all'interno delle formazioni forestali dei "Piceo-Faggeti". Tale formazione forestale è favorita sia nella fase di attecchimento, crescita e sviluppo

dall'esposizione a Nord, Nord-Ovest del versante e della presenza di elevati valori di umidità atmosferica favoriti da un suolo calcareo relativamente poco profondo che, sebbene grossolano dal punto di vista granulometrico, non riesce a smaltire negli strati profondi l'acqua assorbita.

In questo tipo forestale inoltre, si nota la netta prevalenza delle conifere, mentre il faggio costituisce talvolta dei nuclei più o meno estesi, il più delle volte relegato al piano dominato con soggetti di piccole dimensioni di origine "agamica".

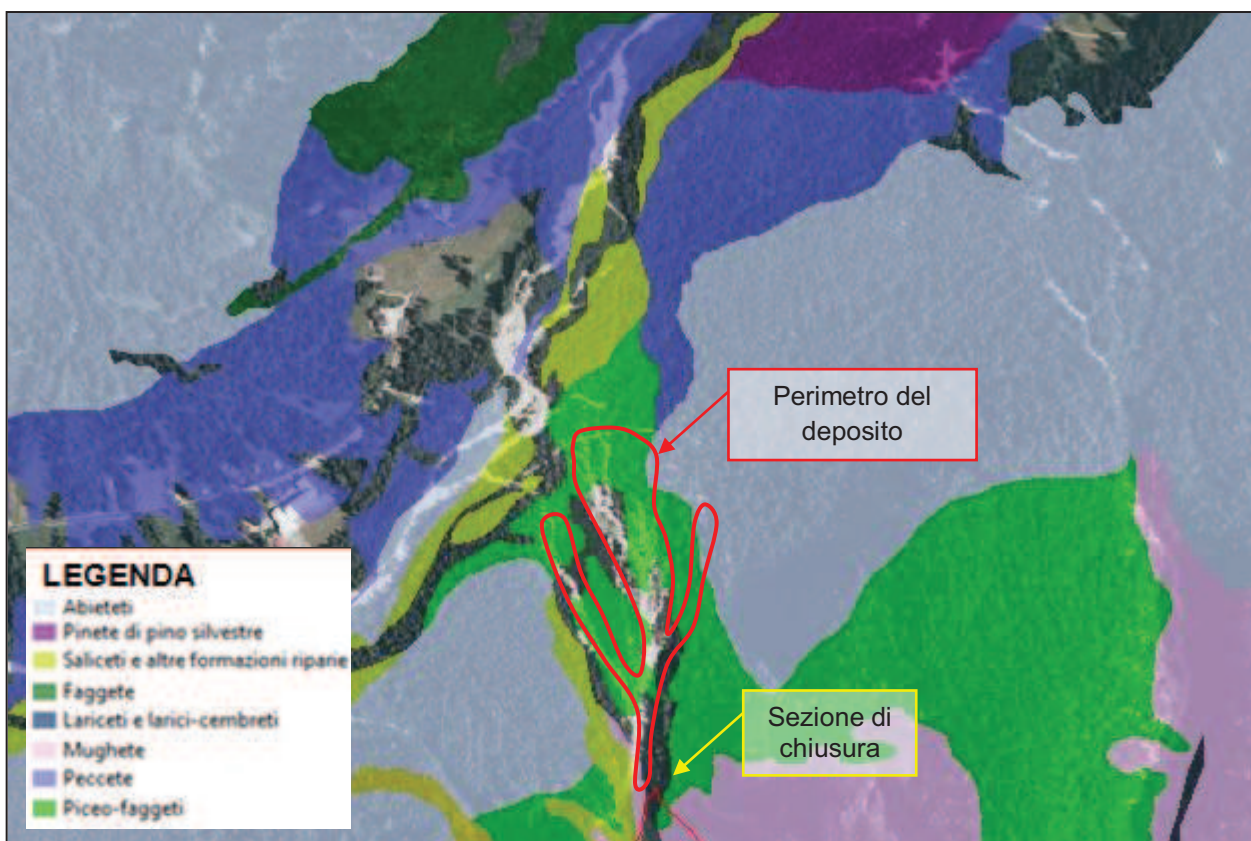


Figura 32 – Ortofoto con indicazione delle tipologie forestali rientranti nel conoide del bacino.

Dal punto di vista strutturale, la copertura forestale si presenta nel complesso irregolare e tendenzialmente disetaneiforme con una forte presenza di individui giovanili, il cui diametro risulta inferiore al diametro di soglia tale da consentire la classificazione a fustaia, ovvero 17.5 cm.

Questo è, molto probabilmente dovuto ad eventi di colate detritiche generate in passato che hanno comportato il crollo o lo sradicamento degli individui maturi.

3.5.3 DESCRIZIONE DELL'USO DEL SUOLO DEL CONOIDE

Per il conoide, come già eseguito per l'intero bacino idrografico, è stata redatta la mappa relativa all'uso del suolo, utilizzando anche in questo caso la cartografia fornita dalla Regione Veneto grazie al Progetto Corine Land Cover.

Come si può ben vedere in Figura 33, nel conoide sono maggiormente diffuse le formazioni forestali degli Abieteti e dei Piceo-faggeti, già descritte al paragrafo precedente. Importante considerazione è da condurre nei confronti del nucleo di Mugheta mesoterma presente al centro del deposito, tra i due rami del collettore idrografico in quanto, essa ha senza dubbio influito significativamente nella deposizione dei sedimenti trasportati dall'evento di colata del luglio 2012, limitandone l'espansione laterale e fungendo come una sorta di "cuneo dissipatore" o "frangicolata".

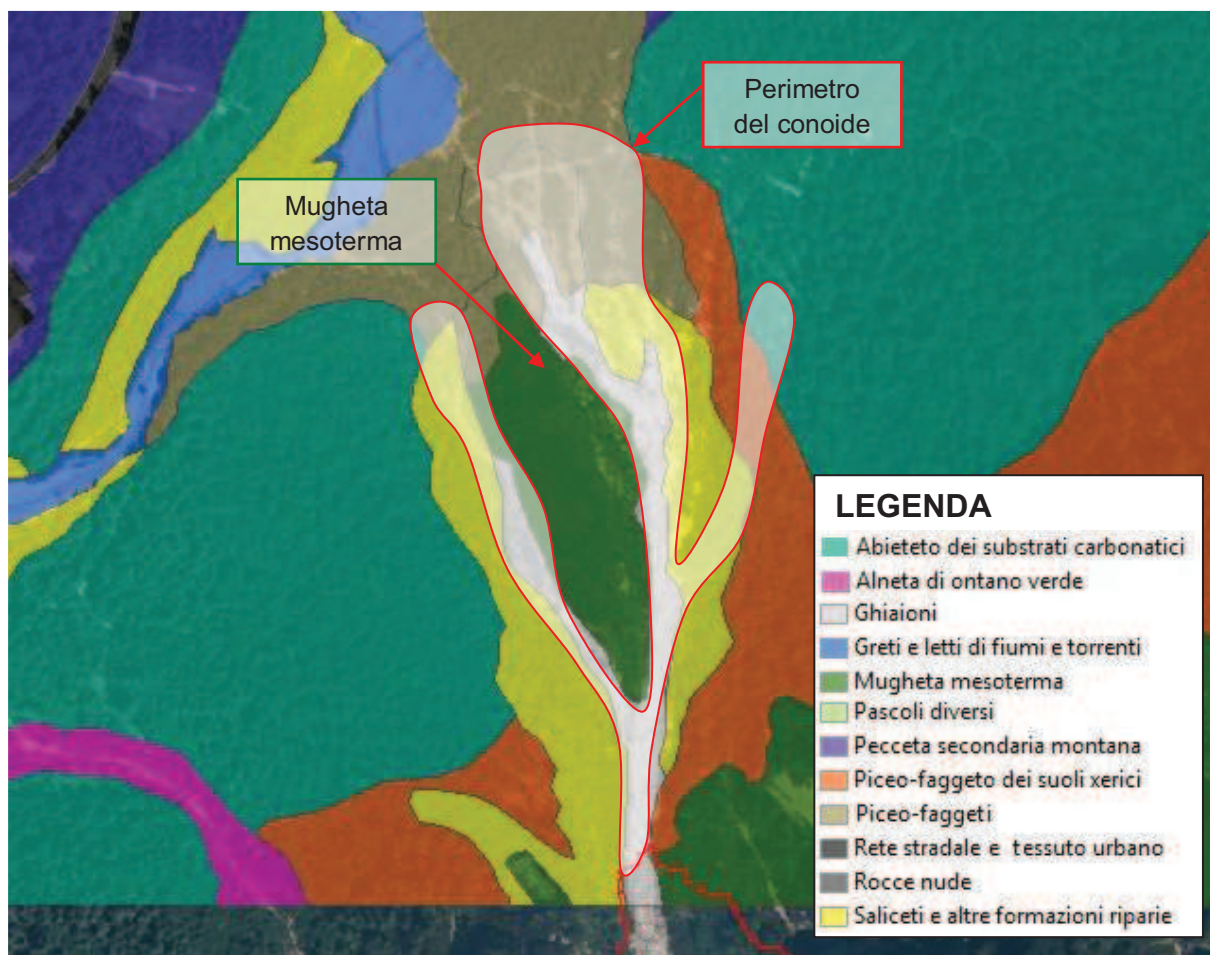


Figura 33 - Ortofoto con indicazione delle tipologie d'uso del suolo presenti nel conoide del bacino.

3.6 ANALISI GRANULOMETRICA DEI DEPOSITI

La granulometria rappresenta la caratterizzazione in termini statistici di una miscela di sedimento, cioè l'identificazione delle singole particelle che caratterizzano un terreno (nel caso oggetto di studio un deposito) in base alle loro dimensioni.

L'obiettivo è quello di definire la frequenza con cui si presentano i diversi diametri al fine di determinare i parametri della distribuzione di frequenza e trarre conclusioni circa le caratteristiche granulometriche e geotecniche del campione analizzato.

Il campionamento può essere effettuato con metodo ponderale o numerale.

- Il metodo *ponderale* necessita della raccolta di un volume di sedimento che successivamente viene analizzato in laboratorio con vagli circolari o quadrati per determinarne le caratteristiche ed è impiegato quando la granulometria del substrato è molto fine e tale da non poter essere campionata con calibri e piastre forate.

- Il metodo *numerale* si applica attraverso il conteggio delle singole particelle appartenenti ad una certa classe diametrica e si applica per campioni superficiali quando la granulometria è grossolana. A sua volta il campionamento nel metodo numerale si distingue in parziale o totale. Il metodo *totale* consiste nell'analisi di tutti gli elementi presenti in una zona ristretta e viene utilizzato per lo più per determinare i parametri granulometrici di corpi sedimentari quali barre di meandro o depositi fluviali. Il metodo *parziale* consiste invece nell'analizzare solamente alcuni elementi presenti nell'area di studio e può a sua volta essere effettuato in linea o a reticolo. In entrambi i casi occorre stabilire la numerosità del campione, al fine di ottenere un'analisi statisticamente valida e l'interdistanza di campionamento, pari a circa una o due volte il diametro massimo del sedimento presente, al fine di evitare il doppio conteggio degli elementi ricadenti all'interno dello stesso transetto.

Le fasi principali attraverso le quali si esegue un'analisi granulometrica si riassumono in:

1. Prelievo e analisi del campione di sedimento (è necessario che questo sia sufficientemente rappresentativo della totalità);
2. Determinazione delle curve di frequenza relativa e cumulata;
3. Calcolo dei diametri caratteristici;
4. Calcolo dei parametri della distribuzione, che consentono di definire le caratteristiche del campione.

La classificazione granulometrica si basa esclusivamente sulla dimensione del sedimento da analizzare.

Il sistema più utilizzato di classificazione granulometrica è la scala di Wentworth. Questa, per facilitarne lo studio della distribuzione di frequenza, può essere reinterpretata secondo la scala “phi” (φ) di Krumbein:

$$\varphi = - \log_2 D (mm) \quad [7]$$

Per la denominazione dei sedimenti si utilizza la classificazione proposta dall'*American Geophysical Union* (AGU) la quale adotta la scala di Wentworth.

Tale analisi granulometrica è essenziale al fine di poter individuare le caratteristiche della componente rocciosa coinvolta nella colata che, nel luglio 2012, si è depositata nel conoide del bacino. Tali caratteristiche, quali diametro medio, matrice, presenza di sabbie e limi sono importantissime nello studio della “reologia” del fenomeno il quale può assumere diversi comportamenti a seconda delle variabili intrinseche (diametro clasti, concentrazioni volumetriche, viscosità e matrice) del materiale trasportato, dando luogo a colate dal comportamento fortemente differente.

Per le analisi, vista l'eterogeneità dei clasti all'interno e la presenza di materiale grossolano si è scelto di utilizzare il metodo di rilievo definito numerale superficiale a reticolo misurando il diametro intermedio di ogni elemento impiegando una piastra forata ad intervalli di 0.5 “phi” (φ). Per quanto riguarda la selezione dei clasti si è adottata una selezione di tipo sistematico lungo linee ad intervalli regolari di ampiezza 1-2 D_{max} presente, al fine di ridurre i possibili errori dovuti all'operatore nella scelta degli elementi.

3.7 STIMA DEL VOLUME O MAGNITUDO DEGLI EVENTI DI COLATA

La magnitudo di un evento di un *debris flow* consiste nella valutazione del volume massimo che potenzialmente può essere trasportato nel flusso. Tale volume può provenire sia dai versanti del bacino idrografico che dall'alveo stesso.

I fattori che maggiormente influenzano il volume potenzialmente movimentabile, e quindi impiegati nella stima della magnitudo, dipendono maggiormente dai seguenti parametri:

- parametri morfometrici: aree del bacino e/o del conoide, indice di Melton, pendenza del bacino, del conoide e/o dell'asta torrentizia principale, lunghezza dell'asta principale, dell'asta "attiva" e/o del canale in conoide e larghezza dell'alveo;
- parametri geologici e geomorfologici: indice geologico, indice di frana, dimensione media dei clasti in conoide;
- parametri idrologici e caratteristiche del materiale presente in alveo: tipologia di trasporto predominante nel canale principale, quantità di detrito per metro lineare di canale, spessore medio dei depositi mobilizzabili in alveo o coefficiente di erodibilità dell'alveo;
- parametri vegetazionali: rapporto tra superficie coperta da vegetazione e superficie totale, età delle specie forestali, grado di espansione dell'apparato radicale;
- fattori antropici: grado di sistemazione del bacino.

I metodi per la stima della magnitudo reperibili in letteratura possono essere raggruppati in tre categorie: formule empiriche a base regionale, stime geomorfiche di campo e metodi idrologici.

3.7.1 METODI EMPIRICI

Le formule empiriche, calcolano la magnitudo di una colata detritica stimano il volume di materiale mobilitato e depositato durante un singolo evento, in funzione di alcune caratteristiche morfometriche e geologiche del bacino idrografico.

Le relazioni empiriche di più semplice applicazione forniscono la stima del volume "Gs" in funzione della superficie del deposito. Iverson *et al.* (1998) per fecolate di fango in materiale piroclastico hanno proposto un approccio basato su un'analisi statistica dei dati di eventi storici. Numerose ricerche hanno confermato la validità del metodo e il loro possibile utilizzo per la previsione delle aree inondate da flussi da colate detritiche (Crosta *et al.*, 2003;. Berti e Simoni, 2007 e 2011; Griswold, 2004; Iverson, 2008; Sheidl e

Rickenmann (2009); D'Agostino *et al.*, 2010). Il concetto di base del metodo consiste nel calcolare l'area planimetrica inondata dai sedimenti depositati durante un evento di colata (A) sia proporzionale al volume totale depositato (V) elevato alla due terzi come stabilito dall'equazione sottostante:

$$A = k V^{\frac{2}{3}} \quad [8]$$

In Tabella 8 vengono riportati i valori del parametro k proposti dai vari autori a seconda del tipo di processo in atto (*granular debris flow*, *debris flow* o *lahars*)

Tabella 8 - Valore del coefficiente k, con esponente fisso $\beta=2/3$ a seconda dei processi presenti.

AUTORI	PROCESSO	REGIONE GEOGRAFICA	k
Berti e Simoni (2007)	<i>debris flow</i>	Alpi, nord Italia	33
Berti e Simoni (2011)	<i>debris flow</i>	Alpi, nord Italia (Bolzano)	18
Crosta <i>et al.</i> (2003)	<i>granular debris flow</i>	Alpi, nord Italia	6.2
D'Agostino <i>et al.</i> (2010)	<i>calcaric debris flow</i>	Alpi, Italia (Fiames, BL)	14
Griswold (2004)	<i>debris flow</i>	Mondiale	19.9
Iverson <i>et al.</i> (1998)	<i>lahars</i>	USA, Columbia, Filippine	200
Sheidl e Rickenmann (2009)	<i>granular debris flow</i>	Alpi, sud Tirolo	17.3
Sheidl e Rickenmann (2009)	<i>granular debris flow</i>	Alpi, Svizzera	28.1
Sheidl e Rickenmann (2009)	<i>debris flow</i>	Alpi, Svizzera	32
Sheidl e Rickenmann (2009)	<i>debris flow</i>	Alpi, Austria	44.7

3.7.2 METODI GEOMORFICI

I metodi geomorfologici permettono di quantificare il volume di un *debris flow* attraverso il rilievo delle aree sorgenti di sedimento, ripercorrendo l'intera rete idrografica allo scopo di valutare adeguatamente la quantità di sedimento che potenzialmente può essere assunto in carico e trasportato dall'evento di colata atteso. Tra i numerosi metodi geomorfologici presenti in letteratura vengono riportati il metodo di Hungr *et al.* (1984) e Spreafico *et al.* (1999).

- **Metodo di Hungr *et al.* (1984)**

Il metodo, basandosi sull'analisi delle aree sorgenti di sedimento localizzate lungo il canale e nelle sue immediate vicinanze, permette di calcolare il volume totale (V) mediante l'equazione:

$$V = \sum_{i=1}^n L_i \cdot e_i \quad [9]$$

In cui “L” rappresenta la lunghezza dei tratti di torrente con caratteristiche di sedimento e “e_i” indica l’apporto detritico per unità di lunghezza ovvero il volume stimato potenzialmente erodibile per unità di lunghezza del tratto analizzato in precedenza (m³/m). Gli autori inoltre, classificando gli alvei torrentizi in 5 classi differenti (dalla A alla E), forniscono i seguenti valori indicativi di apporto detritico unitario e_i (Tabella 9):

Tabella 9 - Valori indicativi dell'apporto detritico per unità di lunghezza per diversi tipi di alvei torrentizi.

Classe	Pendenza Alveo (°)	Materiale alveo	Sponde	Condizioni di stabilità	e _i (m ³ /m)
A	20-35	roccia	Non erodibili	Stabile (virtuale assenza di detrito)	0-5
B	10-20	Sottile strato di detrito o suolo sciolto su roccia	Non erodibili (roccia)	stabile	5-10
C	10-20	Copertura detritica o morenica	Altezza <5m	stabile	10-15
D	10-20	Copertura detritica o morenica	Detrito, altezza >5m	Angolo di riposo del materiale	15-30
E	10-20	Copertura detritica o morenica	Detrito altezza >20m	Sponde potenzialmente instabili (area di frana)	Fino a 200 (sorgente di detrito localizzata)

- **Metodo di Spreafico *et al.* (1999)**

Questo metodo, simile a quanto proposto da Hungr *et al.* (1984), ma molto più dettagliato dal punto di vista analitico consiste nello stimare il volume erodibile separatamente per il letto del corso d’acqua e per le due sponde laterali mediante le formule seguenti:

- Per il calcolo del volume erodibile dal fondo, V_{alveo} (m³):

$$V_{alveo} = k \cdot L \cdot b \cdot d \quad [10]$$

Dove L è la lunghezza del tratto di alveo (m); b è la larghezza media dell’alveo (m); d è la profondità media di erosione (m) e k è il fattore di riduzione.

- Per il calcolo del volume erodibile dalle sponde, V_{sponde} (m³):

$$V_{sponde} = k \cdot L \cdot h \cdot d \quad [11]$$

Dove L è la lunghezza di un tratto di sponda (m); h la sua altezza (m); d la profondità media di erosione (m) proposta pari a 0.5-1 m per erosioni superficiali, fino 2 m per aree fortemente instabili e k che è un fattore di riduzione compreso fra 0.5 e 0.8 m (D'Agostino V., appunti del corso "Protezione dal rischio idrogeologico", 2014).

I metodi geomorfologici, grazie all'analisi dettagliata di tutta l'asta torrentizia al fine di individuare le aree sorgenti di sedimento, forniscono i valori della produzione di sedimento e quindi valori di magnitudo più attendibili. La principale difficoltà che si incontra nell'applicazione di tali metodologie è una definizione oggettiva dello strato erodibile in una data area sorgente di sedimento in quanto questa viene valutata in modi diversi a seconda di una differente "lettura del territorio" da un tecnico all'altro.

3.7.3 METODO IDROLOGICO

Il pregio essenziale del metodo idrologico è quello di valutare se la quantità di acqua caduta è sufficiente a muovere la quantità di sedimento stimata ed innescare così il fenomeno. In questo metodo dunque si lega la portata totale della colata detritica al tempo di ritorno dell'evento meteorico che lo ha generato.

Il metodo, proposto da Takahashi (1991), consiste nello stimare ideologicamente la portata liquida transitante alla sezione di chiusura (Q) ed entrante in conoide tenendo conto della permeabilità e dell'uso del suolo del bacino, dei tempi di risposta che lo caratterizza e della durata della precipitazione associata all'innescamento della colata detritica. Quindi, la portata al picco del *debris flow* è calcolata applicando la seguente equazione:

$$Q_{d\ max} = Q_{l\ max} \left(\frac{C_*}{C_* - C} \right) \quad [12]$$

Dove C* rappresenta la massima concentrazione del materiale costituente l'ammasso e può assumersi pari a 0,65; C è la concentrazione di equilibrio del fronte stazionario della colata in movimento e per pendenze del fondo superiori al 20° è pari a:

$$C = 0.9 \cdot C_* \quad [13]$$

Con pendenze di fondo inferiori ai 20° il parametro C assume diversi valori a seconda della pendenza del canale, della densità e dell'angolo di attrito interno dei sedimenti dei sedimenti.

Il difetto di questo metodo sta nell'assumere il valore della concentrazione di equilibrio "C" costante per tutto l'evento e quindi nel non calcolare correttamente la portata totale della colata detritica transitante alla sezione di chiusura.

Per ovviare questo difetto, D'Agostino e Marchi (2003) hanno modificato il metodo di Takahashi (1991) facendo variare la concentrazione solida "C" del *debris flow* nel tempo, per una maggiore corrispondenza con la realtà del fenomeno.

Le basi su cui si basa l'approccio metodologico proposto dagli autori sono:

1. colata detritica generata da un evento pluviometrico di forte intensità e breve durata (evento temporalesco compreso tra i 15 e i 90 minuti) di assegnato tempo di ritorno.
2. alveo con quantità illimitata di sedimenti. Viene mobilizzato tutto il sedimento asportabile dalla "portata liquida", più precisamente, la disponibilità illimitata di sedimento viene ipotizzata in concomitanza del transito della portata di colmo dell'idrogramma liquido;
3. portata di picco del *debris flow* (Q_d), intesa come somma della portata liquida "Ql" e della portata solida "Qs" determinata nell'ipotesi di scorrimento di una portata di acqua pulita su di un ammasso granulare completamente saturo.

Q_d può allora stimarsi con la seguente formula:

$$Q_d(t) = Q_l(t) \left(\frac{C_*}{C_* - C(t)} \right) \quad [14]$$

Con C_{picco} e C^* determinati analogamente al metodo di Takahashi

4. variazione del coefficiente C durante gli intervalli di tempo che precedono e seguono l'istante di picco dell'*debris*gramma. L'ipotesi è quella di far iniziare l'onda della colata in corrispondenza al transito di una portata liquida (Q) pari a 2.5-3 volte la portata di inizio del trasporto di fondo (Q_c), determinata utilizzando la formula di Schoklitsch (1962):

$$Q_c = 0.26 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{5/3} \frac{D_{40}^{3/2}}{S^{7/6}} B \quad [15]$$

In cui S è la pendenza del fondo del canale; ρ_s indica la densità dei sedimenti presenti (2600 – 2700 kg/m³); ρ è la densità dell'acqua e B: larghezza del alveo.

Si determina così il primo valore della portata del *debris flow* (Q_d) con un valore di C minimo pari a 0.2. In quanto è noto che l'arrivo di una colata detritica viene spesso preceduto da un flusso iperconcentrato. Si determinano i successivi valori di Q_d ammettendo un andamento lineare di C , da C_{min} a C_{max} , in funzione del tempo. In modo analogo si procede per la costruzione della fase discendente dell'onda di piena del *debris flow*, ipotizzando che l'ultimo valore di Q_d sia ancora determinato da $Q = 2.5 Q_c$, da $C_{min} = 0.2$ e che la riduzione di C sia lineare a partire dal valore di picco C_{max} .

La stima del volume solido trasportato dalla colata detritica sarà condotta calcolando l'area sottesa alla curva di portata totale del *debrisgramma*, sottraendo al volume totale (solido + liquido) il volume liquido "innescante" (coincidente con la quantità d'acqua caduta dalla precipitazione meteorica) ed il volume liquido "liberato dal pendio" dipendente dalle condizioni di saturazione e quindi dalla concentrazione volumetrica dei sedimenti.

3.7.4 STIMA DEL VOLUME DEPOSITATO SUL CONOIDE DEL BACINO

Al fine di stimare il volume complessivo depositatosi nell'area conoidale del bacino in seguito all'evento meteorologico del 30 luglio 2012 (Figura 34), si sono rese necessarie due operazioni di rilievo quali: rilievo del contorno o perimetro planimetrico dell'area occupata dal deposito e rilievo dello spessore del deposito.

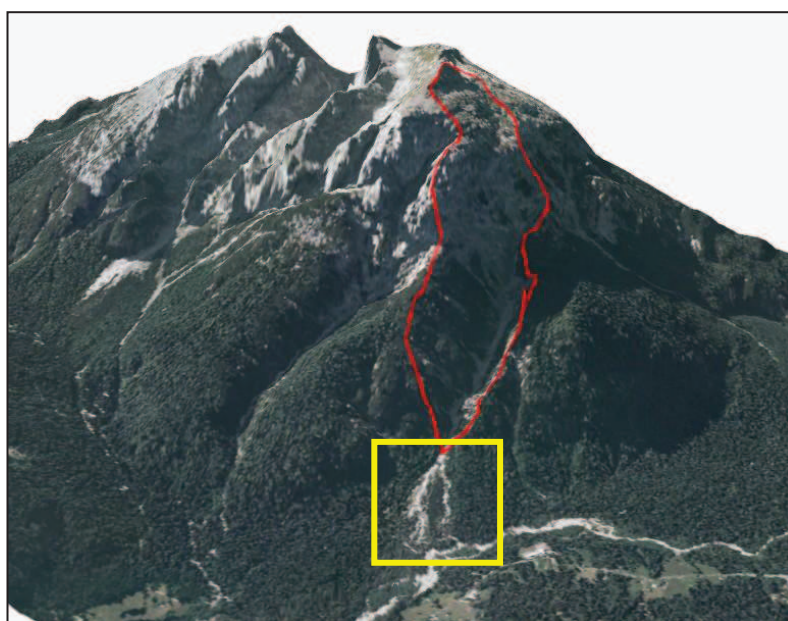


Figura 34 - Rappresentazione 3D dello spartiacque (rosso) e del conoide (giallo) del bacino.

La perimetrazione dell'area di deposito è stata compiuta eseguendo un rilievo topografico del deposito percorrendo l'intero limite esterno e contemporaneamente registrando la posizione GPS del tracciato/punti percorso (Figura 35).

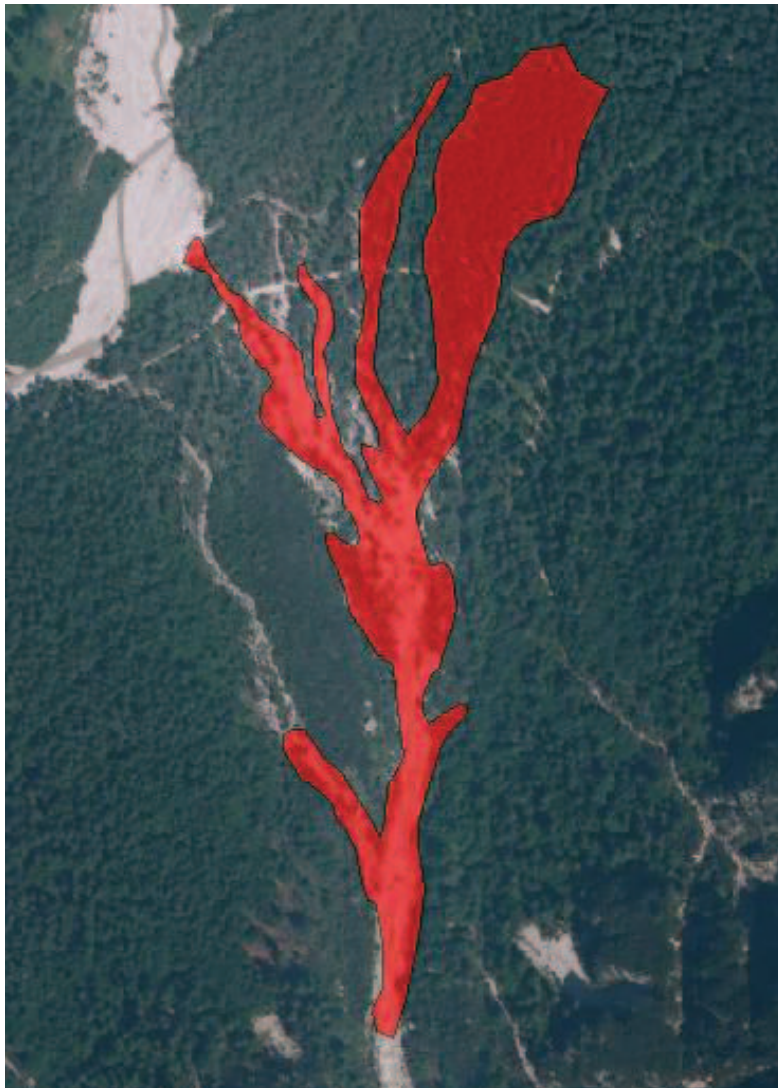


Figura 35 – Individuazione del contorno del conoide detritico depositatosi in seguito alla colata del 30 luglio 2012.

Durante le operazioni di rilievo sono state inoltre eseguite le misurazioni relative allo spessore del deposito le quali, messe in relazione alla superficie totale del deposito, risultano essenziali alla stima del volume che si è depositato in seguito all'evento.

La stima del volume del deposito è stata realizzata mediante due approcci ovvero: rilievi di campo ed elaborazione in ambiente GIS e confronto con l'approccio idrologico.

Considerando l'approccio di campo, la stima del volume del deposito è stata inizialmente eseguita attraverso l'impiego di specifici *tools* implementati nei comuni software di Analisi e Gestione di dati territoriali.

Un problema frequentemente incontrato nell'analisi spaziale dei dati è rappresentato dalla difficoltà nell'ottenere un valore medio areale della variabile in corrispondenza di una certa superficie come ad esempio in questo caso la stima del volume medio totale del conoide riferita ad una serie di misurazioni puntuali eseguite direttamente in campo. Questa avviene individuando e adottando opportune tecniche di interpolazione del dato puntuale, consentendo così di ottenere una stima areale.

Il calcolo del volume totale, depositatosi nel conoide del bacino, in seguito all'evento di colata detritica del 30 luglio 2012 è stato condotto utilizzando il software ArcGIS, utilizzando i seguenti *tools* di interpolazione implementati in esso e descritti nei paragrafi successivi ovvero:

- Interpolazione degli spessori con il metodo dei topiети (o poligoni di Thiessen)
- IDW o *Inverse Distance Weighted*
- Interpolazione degli spessori con il metodo DTM (*Topo to Raster*)

- INTERPOLAZIONE DEGLI SPESSORI CON IL METODO DEI TOPOIETI (O POLIGONI DI THIESSEN)

Questo metodo, che trova maggior applicazione in idrologia per il calcolo della precipitazione media areale, consiste nell'individuare le aree più vicine alle singole stazioni di misura alle quali viene assegnato, il valore rilevato nella stazione di competenza che ricade in esse

Per individuare le aree di competenza di ogni punto (detti poligoni di Thiessen) ci si avvale di un procedimento geometrico, schematizzato secondo quanto segue: inizialmente si uniscono i punti di noto spessore formando così dei triangoli; successivamente per i lati di ciascun triangolo si tracciano le perpendicolari nei punti medi e i punti d'incontro di dette perpendicolari costituiranno i vertici dei poligoni dei vari poligoni di Thiessen. Dopo aver determinato la superficie di competenza, ad ogni singolo poligono viene assegnato un "peso" applicando la seguente equazione generale dei ponderatori:

$$\lambda_i = \frac{S_i}{S_{tot}} \quad [16]$$

Dove: S_i rappresenta l'area di competenza del punto rilevato, ovvero l'estensione del poligono; S rappresenta l'intera regione di studio, ovvero l'intera estensione del conoide.

Lo spessore medio del conoide sarà ottenuto utilizzando la formula seguente:

$$SMC = Spessore\ Medio\ del\ Conoide = \sum_{i=1}^N (h_i \times \lambda_i) \quad [17]$$

Dove: h_i è l'altezza dello spessore del poligono (misurato puntualmente); λ_i , calcolato con l'equazione [16], rappresenta il peso del singolo poligono.

Noto lo spessore medio del conoide, il **volume medio totale** sarà di conseguenza ottenuto dalla seguente equazione:

$$Volume\ totale\ del\ conoide = SMC \times S_{tot} \quad [18]$$

- INTERPOLAZIONE DEGLI SPESSORI CON IL METODO IDW (INVERSE DISTANCE WEIGHTED)

Anche questo metodo di interpolazione, come il metodo dei topoi, trova maggior applicazione in campo idrologico per la stima della precipitazione media areale di una determinata superficie. Vista la sua molteplicità di applicazioni si è deciso comunque di applicarlo al fine del calcolo del volume del conoide generatosi in seguito alla colata detritica oggetto di studio.

In questo metodo il software inizialmente "rasterizza" l'area in analisi ovvero procede a "coprire" la superficie interessata con una matrice o *kernel* di celle quadrate le cui dimensioni vengono stabilite a priori dall'operatore; successivamente ciascun valore di spessore rilevato puntualmente avrà un'influenza nel processo di interpolazione che diminuirà all'aumentare della distanza dalla singola cella del raster.

I valori di spessore rilevati più vicini alla cella avranno un peso di influenza maggiore nel processo di interpolazione rispetto a quelli spazialmente più distanti e meno significativi.

Il valore medio totale del volume in conoide viene ottenuto automaticamente dal software ArcGis mediante il tool "IDW" per mezzo della seguente equazione:

$$Volume\ medio\ totale\ del\ conoide = \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{ij}^\alpha} \times PE_i \quad [19]$$

Dove: i sono i punti di spessore rilevati; d_{ij} è la distanza di ogni punto dalla cella in esame;

α è un parametro di potenza (comunemente uguale a 2); PE_i è il valore di spessore per il punto rilevato i .

- INTERPOLAZIONE DEGLI SPESSORI CON IL METODO DTM (*TOPO TO RASTER*)

Il modello digitale del terreno (DTM), rappresenta le quote di un territorio o più generalmente di una superficie, in formato digitale.

Il raster del DEM è stato utilizzato in precedenza come principale dato di input per effettuare le elaborazioni atte ad identificare alcuni parametri morfometrici del bacino quali: quote, superfici, pendenza ed esposizione, distribuzione dell'area in funzione della quota, curva ipsometrica e i parametri morfometrici del collettore principale.

Impiegando il tools "*Topo to Raster*" presente nel software ArcGis e, fornendo come dati in input di quota i valori degli spessori rilevati si è ottenuti automaticamente il raster relativo allo spessore medio del deposito in cui ogni cella assume un valore medio tra i punti rilevati puntualmente durante i rilievi.

In questo caso, noto il valore, ovvero lo spessore medio di ogni cella del raster e la risoluzione (dimensione della cella), il **volume medio totale** del conoide sarà di ottenuto dalla seguente equazione:

$$Volume\ totale\ del\ conoide = \sum h_i \cdot A_i \quad [20]$$

In cui h_i rappresenta il valore di spessore calcolato per ogni cella i del raster e A_i indica la superficie coperta dalla cella.

3.8 RILIEVO DELLA VEGETAZIONE IN DEPOSITO

Nei confronti **del deflusso**, numerosi studi (Cowan, 1956 e Wei Song *et al.* 2002 per citarne alcuni) hanno confermato un significativo aumento della scabrezza nelle aree con maggior densità di specie erbacee, arbustive ed arboree che si traduce, dal punto di vista idraulico, in riduzione della velocità favorendo la deposizione degli elementi lapidei trasportati. Nei confronti delle caratteristiche di **stabilità e consolidamento del suolo** terreni caratterizzati da un'estesa copertura vegetale sono in grado di contrastare più efficacemente i fenomeni erosivi causati sia dell'acqua di precipitazione che impatta e scorre al suolo, sia dall'azione degradativa definita "abrasiva" delle colate detritiche che, soprattutto durante la fase di scorrimento, provoca l'asportazione del materiale litologico superficiale, favorendo ulteriori e successivi dissesti ed incrementando il volume complessivo dell'evento. Nei confronti dei **parametri "geometrici" dei depositi**, come già confermato da *Ishikawa* (2002), il ruolo della componente forestale nei versanti montani garantisce un'importantissima funzione di prevenzione e mitigazione nei confronti dei disastri causati da fenomeni di *debris flow* o da correnti iperconcentrate infine, provocando una significativa riduzione della *runout* e quindi dell'area del deposito, incrementando a parità di volume depositato lo spessore del deposito e riducendo sensibilmente gli sforzi e le pressioni di impatto generate dal fenomeno.

Al fine di analizzare l'influenza della vegetazione nei confronti del processo di deposizione di eventi di trasporto solido intensi, quali colate detritiche, durante le operazioni di rilievo, è stato eseguito il campionamento dell'intero soprasuolo forestale sviluppato nell'area di deposito.

Nello specifico, è stato eseguito un rilievo topografico per consentire la georeferenziazione di ogni pianta, o nuclei di piante (nei casi di eccessiva densità) e la contemporanea compilazione di una scheda.

Il rilievo è stato eseguito facendo 12 stazioni in area conoidale e acquisendone la posizione con GPS (Trimble). Da ogni stazione, impiegando un distanziometro laser è stata acquisita la posizione relativa degli individui forestali. Per l'analisi successive è stato scelto di preparare e compilare una scheda di campo riportante le caratteristiche di maggiore rilievo della vegetazione interessata dal processo che si sono pensate avere un ruolo importante nei confronti del processo analizzato. Queste sono: posizione relativa, per una corretta rappresentazione planimetrica degli individui in

conoide, per una corretta definizione del parametro della scabrezza e per una successiva simulazione e modellazione più accurata possibile; caratteristiche dendrometriche quali **specie** e **diametro** a petto d'uomo (1.30 m) del singolo individuo o diametro complessivo "dell'area disturbata" del nucleo molto denso; spessore del deposito di monte e di valle (lungo la direzione di deflusso), rilevato ai fini di controllo e utile a determinare una possibile relazione "diametro-volume intercettato"; inclinazione della pianta, rispetto all'orizzontale, dovuta alla forza di impatto della colata; posizione rispetto al deposito, ad esempio: lato deposito, centro deposito, ...; stato vegetativo (vivo o morto).

Il risultato di tale rilievo viene riportato in Figura 36, nella quale, mediante la rappresentazione in ambiente GIS, vengono raffigurati i punti coincidenti a tutti gli individui forestali rilevati nel conoide oggetto di studio.

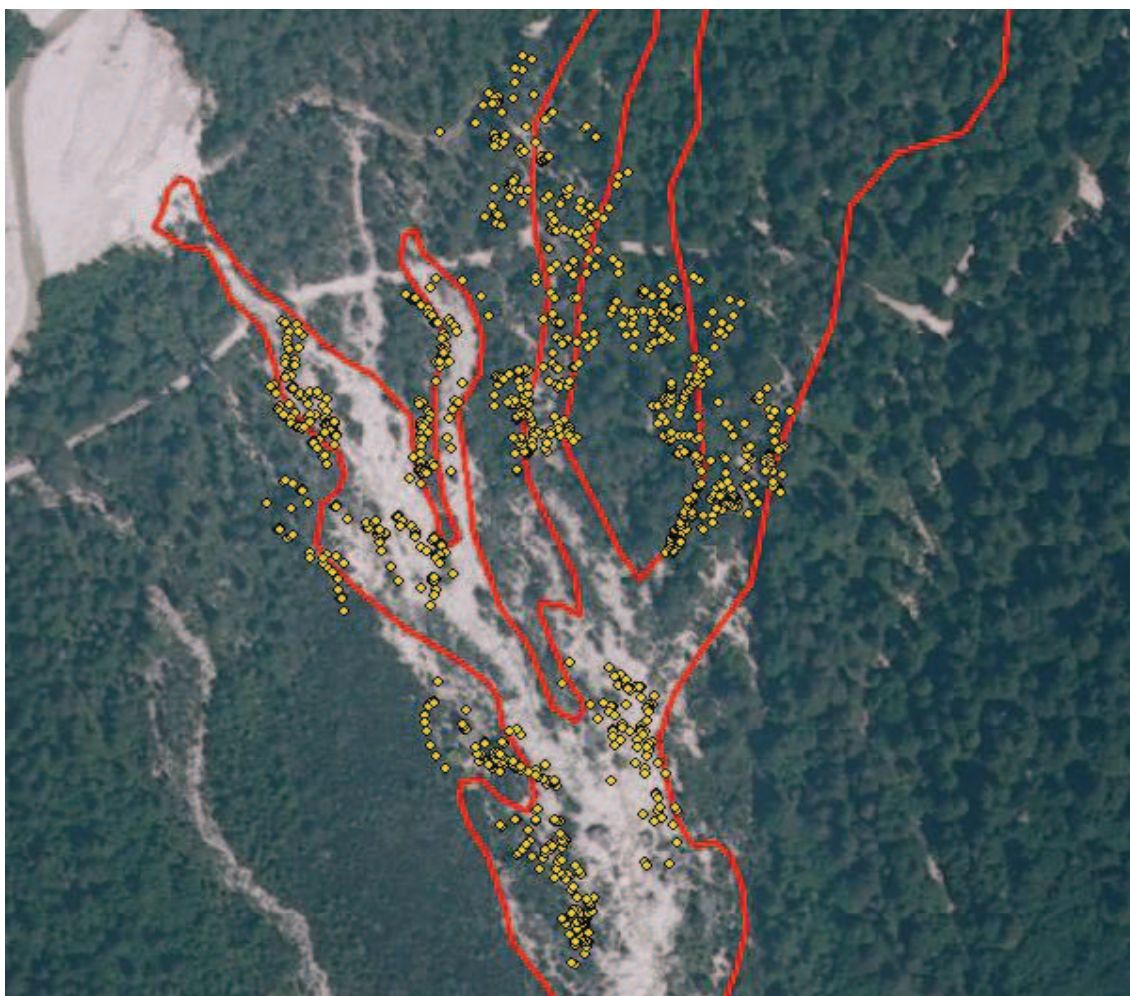


Figura 36 - Ortofoto con rappresentazione degli individui forestali rilevati in conoide.

3.9 AREE DI SAGGIO PER IL RILIEVO DELLA COMPONENTE FORESTALE

Successivamente al rilievo della distribuzione spaziale del fenomeno e della componente forestale sono state scelte nel conoide una serie di zone all'interno del conoide rappresentanti l'"area disturbata", ovvero interessata dal deposito della colata detritica e la cosiddetta "area non disturbata", dove tale fenomeno non si è presentato.

3.9.1 AREA NON DISTURBATA

Il rilievo del soprassuolo forestale nella zona non disturbata, è stato realizzato attraverso un campionamento parziale effettuando alcune aree di saggio nella foresta di conoide allo scopo di caratterizzare il soprassuolo forestale. Essendo il popolamento di origine gamaica, governato "a fustaia", si è scelto di realizzare aree di saggio di forma circolare, con raggio 10 m, insistente dunque in una superficie di circa 314 m². Definite le aree si è proceduto al cavallettamento totale della componente forestale. Si è deciso di rilevare anche i diametri al di sotto della comune soglia di censimento ovvero di 17,5 centimetri protraendosi fino al diametro di 5 cm, vista la grande presenza di individui giovani e l'elevata rinnovazione agamica del faggio, componente cedua del popolamento insistente nel piano dominato e in virtù delle analisi specifiche di interesse nella presente ricerca.

3.9.2 AREA DISTURBATA

Nell'area disturbata è stato eseguito un campionamento totale del soprassuolo arboreo ed arbustivo.

In queste aree sono inoltre stati annotati i danni visibili, imputabili allo scorrimento e deposito della colata, quali:

- individui morti, distinguendoli tra "individui a terra", "individui in piedi" e:
 - a) Individui schiantati: piante a terra a causa di una tensione esterna superiore rispetto alla resistenza meccanica garantita dall'apparato radicale e dal suolo;
 - b) Individui stroncati: piante caratterizzate dalla rottura del fusto al di sopra del colletto radicale soprattutto a causa di un violento impatto;
- abrasioni presenti sulla corteccia: segni evidenti riguardo la severità del fenomeno
- individui inclinati: piante con baricentro spostato a valle in seguito alla collisione con i sedimenti inglobati nella massa detritica;
- spessore del materiale detritico trattenuto a monte degli individui, sia arborei che arbustivi.

3.10 IL MODELLO IDROLOGICO PER LA DETERMINAZIONE DEGLI IDROGRAMMI

Un modello idrologico è uno strumento che trasforma la precipitazione che cade al suolo in deflusso superficiale, la trasferisce al corso d'acqua principale e calcola la portata liquida generata transitante alla sezione di chiusura del bacino considerato. L'acqua di precipitazione che giunge al suolo può infiltrarsi o defluire superficialmente a seconda delle caratteristiche del sito, quali pendenza, vegetazione, permeabilità del suolo e dalle condizioni di saturazione del suolo antecedenti alla precipitazione considerata. La precipitazione che non si infiltra, rappresentando il cosiddetto deflusso superficiale, viene convogliata verso un unico punto, ovvero la sezione di chiusura del bacino e, dall'analisi della portata transitata messa in relazione al tempo si ottiene un grafico, definito idrogramma di piena.

Per la determinazione dell'idrogramma liquido di piena, riferito all'evento del 30 luglio 2012, è stato utilizzato il modello definito **KLEM** (*Kinematic Local Excess Model*), implementato nel software GIS AdB Toolbox (versione 1.8).

Essendo un modello "ad evento" ovvero, simula il comportamento di un determinato bacino idrografico in occasione di eventi meteorici di notevole intensità, trascurando dunque le dinamiche legate al ciclo idrologico quali evapotraspirazione, assorbimento dagli individui vegetali ecc. ed è basato sul calcolo della pioggia efficace e il calcolo della propagazione alla sezione di chiusura.

Per quanto concerne il calcolo della precipitazione efficace, ovvero l'aliquota di precipitazione in grado di alimentare il deflusso superficiale, la metodologia si basa sul metodo del CN-SCS (*Soil Conservation Service*, basato sul *Curve Number*) sviluppato dal Ministero dell'Agricoltura americano nel 1972. La schematizzazione del metodo è illustrata e spiegata in Figura 37 e Tabella 10.

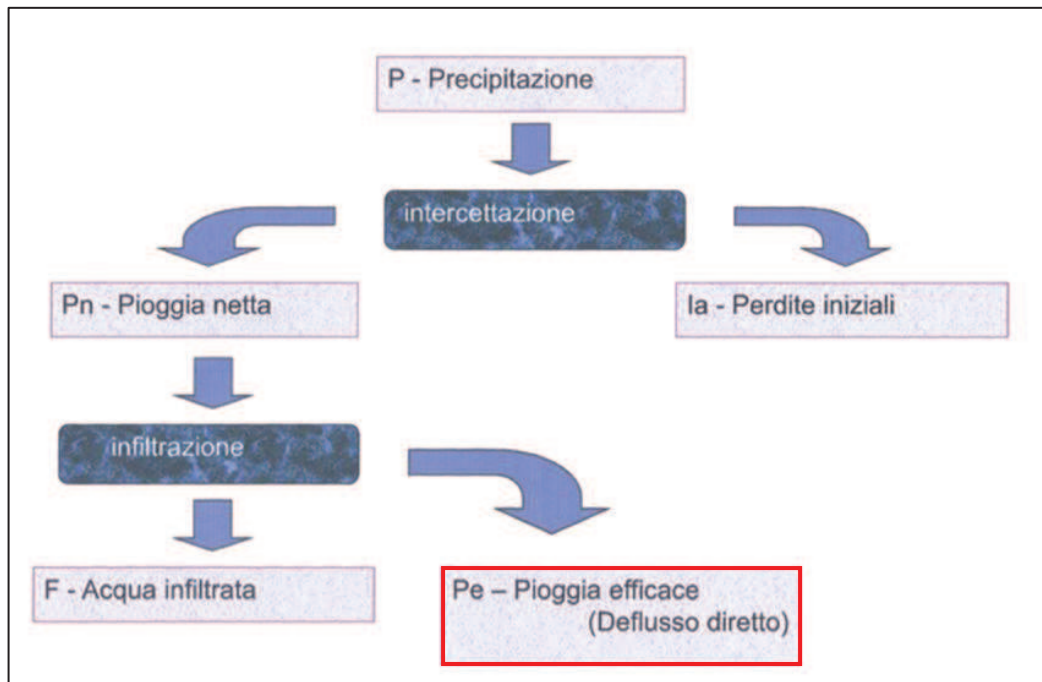


Figura 37 - Schema del metodo SCS.

Tabella 10 - Tabella esplicativa dei parametri utilizzati nel metodo SCS.

Il modello del SCS assume quindi che ogni superficie territoriale sia caratterizzata da un volume specifico di saturazione S il quale, come detto in precedenza, viene stimato sulla base delle caratteristiche del suolo e del soprassuolo; questi, oscilla tra 0 nel caso di superfici a permeabilità e conducibilità idrica estremamente bassa, e ∞ (valori puramente teorici) nel caso di superfici ad elevata permeabilità e conducibilità idrica. In condizioni sature, il volume specifico infiltrato F , sarà massimo pari al volume specifico di saturazione S e il volume specifico di deflusso diretto P_e sarà al massimo pari alla precipitazione netta P_n . Per la determinazione della precipitazione efficace, il metodo SCS ipotizza che i rapporti tra le due grandezze reali e le due potenziali siano sempre uguali tra di loro secondo la seguente equazione:

$$\frac{F}{S} = \frac{P_e}{P_n} \quad [21]$$

Considerando le eguaglianze definite in Tabella 10 si ottiene la seguente equazione generale del metodo SCS:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad [22]$$

Le perdite iniziali I_a vengono di norma assunte pari ad una frazione di S e nel modello KLEM, per i bacini montani sono poste pari a $I_a=0.1S$. La stima del valore del volume specifico di saturazione S avviene tramite la seguente relazione dipendente dal valore del *Curve Number* (CN):

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad [23]$$

Il CN esprime la tendenza del suolo a produrre deflusso superficiale e viene ottenuta dall'incrocio tra la carta di copertura del e la carta dei gruppi idrologici. I gruppi idrologici sono definiti sperimentalmente dal metodo SCS-CN in funzione della permeabilità complessiva del terreno e della geologia e divisi in 4 classi (A, B, C, D):

Gruppo A: suoli a bassa capacità di deflusso superficiale con elevata propensione all'infiltrazione anche se completamente saturi (es: sabbie e ghiaie profonde ben drenate) con notevole conducibilità idrica;

Gruppo B: suoli con moderata infiltrazione se saturi, discretamente drenati e profondi con tessitura medio-grossolana e conducibilità idrica media;

Gruppo C: suoli a tessitura medio-fine con bassa infiltrazione se saturi caratterizzati dalla presenza di uno strato che inibisce la percolazione verticale e con conducibilità idrica bassa;

Gruppo D: suoli a elevata capacità di deflusso superficiale, poco profondi e ricchi di argilla con conducibilità idrica molto bassa.

Il parametro CN dipende anche dalle condizioni di saturazione del suolo (*Antecedent Moisture Condition*, AMC), esaminando l'altezza cumulata di pioggia caduta nei 5 giorni antecedenti l'evento considerato e lo stato vegetativo della stagione in corso.

I tempi di propagazione del deflusso, sia lungo il versante che sul reticolo idrografico, è fondamentale poiché la precipitazione efficace " P_e " necessita di un certo lasso temporale, provenendo dal cosiddetto "punto di caduta", per transitare attraverso la sezione di chiusura. Questo tempo viene definito "Tempo di propagazione o Tempo di residenza" ed è calcolato dal software adottando il modello cinematico. Tale modello, per ciascuna cella del bacino, calcola le velocità assunte dal deflusso discriminandole tra velocità di versante e velocità di lungo il reticolo; la velocità sul versante dipende dalla tipologia di copertura o di uso del suolo mentre la velocità lungo il reticolo, necessita della conoscenza di un valore medio di velocità rilevato lungo tutte le aste presenti nel bacino idrografico.

Utilizzando tali velocità e la lunghezza del percorso di propagazione, il modello calcola i tempi di propagazione e, sommando i singoli contributi di pioggia efficace che raggiungono la sezione di chiusura nello stesso istante, determina il volume di deflusso superficiale (V_{ti}) generato e transitante alla sezione di chiusura in ogni momento durante tutta la durata dell'evento. Dal punto di vista operativo non potendo valutare l'andamento "istante per istante" si semplifica l'operazione di calcolo definendo un intervallo temporale di durata Δt e l'equazione sarà dunque:

$$V_{i\Delta t} = \sum Pe_{i(\Delta t)} \times A_i \quad [24]$$

In cui: $Pe_{i(\Delta t)}$ rappresenta l'altezza di pioggia efficace prodotta in ogni cella i del bacino, transitante alla sezione di chiusura nel medesimo arco temporale Δt e A_i indica l'area della cella i .

La valutazione del percorso di propagazione si basa sulla differenza di quota calcolata rispetto alle otto celle presenti al contorno, il percorso di deflusso (e la conseguente lunghezza) è individuato nella direzione dove si registra la maggior pendenza tra la cella e quelle adiacenti.

Infine, nota la portata "di base" (Q_b), ovvero la portata già transitante alla sezione di chiusura, la portata totale attraversante la sezione di chiusura (Q_i), sempre assumendo un intervallo temporale pari a Δt , verrà calcolata con la seguente equazione:

$$Q_i = Q_b + \frac{V_{i(ti)}}{\Delta t_i} \quad [25]$$

Il modello, per eseguire la corretta simulazione idrologica, necessita di una serie di i dati di input quali:

- **DTM depittato** (*dem depit*) --- *Figura 38 - A*

Il depittaggio del DTM permette di eliminare le zone depresse (*pits*), le quali dal punto di vista idrologico, avendo una quota altimetrica inferiore rispetto a quella dei pixel adiacenti, isolano dalla sezione di chiusura determinate porzioni di bacino trasformandosi in veri e propri “pozzi”. Con questa operazione si garantisce a tutta l’area drenata del bacino di poter contribuire alla formazione del deflusso transitante alla sezione di chiusura.

- **Direzioni di deflusso** (*flowdir*) --- *Figura 38 - B*

L’individuazione delle direzioni di deflusso permette il collegamento di ogni singola cella dell’area drenata alla sezione di chiusura, attraverso un percorso univoco utilizzando uno dei quattro metodi di calcolo implementati in AdB Toolbox (D8, MultiFlow, D Infinito, D8 Facets).

1. D-8: è l’algoritmo tradizionale di calcolo. Viene calcolato il gradiente di quota (pendenza) verso le otto celle circostanti sulla base della differenza di quota e della distanza tra i centri delle celle. Si suppone quindi che il deflusso scelga la direzione della massima pendenza.
2. MultiFlow: calcolati i gradienti (come nel D8) il deflusso viene suddiviso tra tutti i percorsi possibili (quelli con gradiente negativo e logicamente in discesa) con percentuali diverse date da un fattore di pesatura proporzionale ai gradienti stessi.
3. D-Infinito: il gradiente di quota viene calcolato sugli otto “facets” triangolari, di ampiezza 45°, ciascuna costituita da tre vertici di diversa quota. I due facets adiacenti condividono la cella centrale e una cella del kernel e i tre vertici individuano univocamente un piano inclinato la cui pendenza ha una specifica direzione. Degli otto piani si sceglie quello con pendenza massima.
4. D8 Facets: costituisce una variante del modello “D8 Classic” in cui l’azimut viene calcolato a “facets” con le stesse modalità di “D-Infinito” ma forzato ad assumere un valore multiplo di 45°.

- **Area drenata** (*upslope area*) --- *Figura 38 - C*

Questa funzione, mediante l’utilizzo del modello unidirezionale di flusso D8 permette l’identificazione della superficie drenata relativa all’intera area oggetto di studio.

Mappa del Curve Number --- *Figura 38 - D*

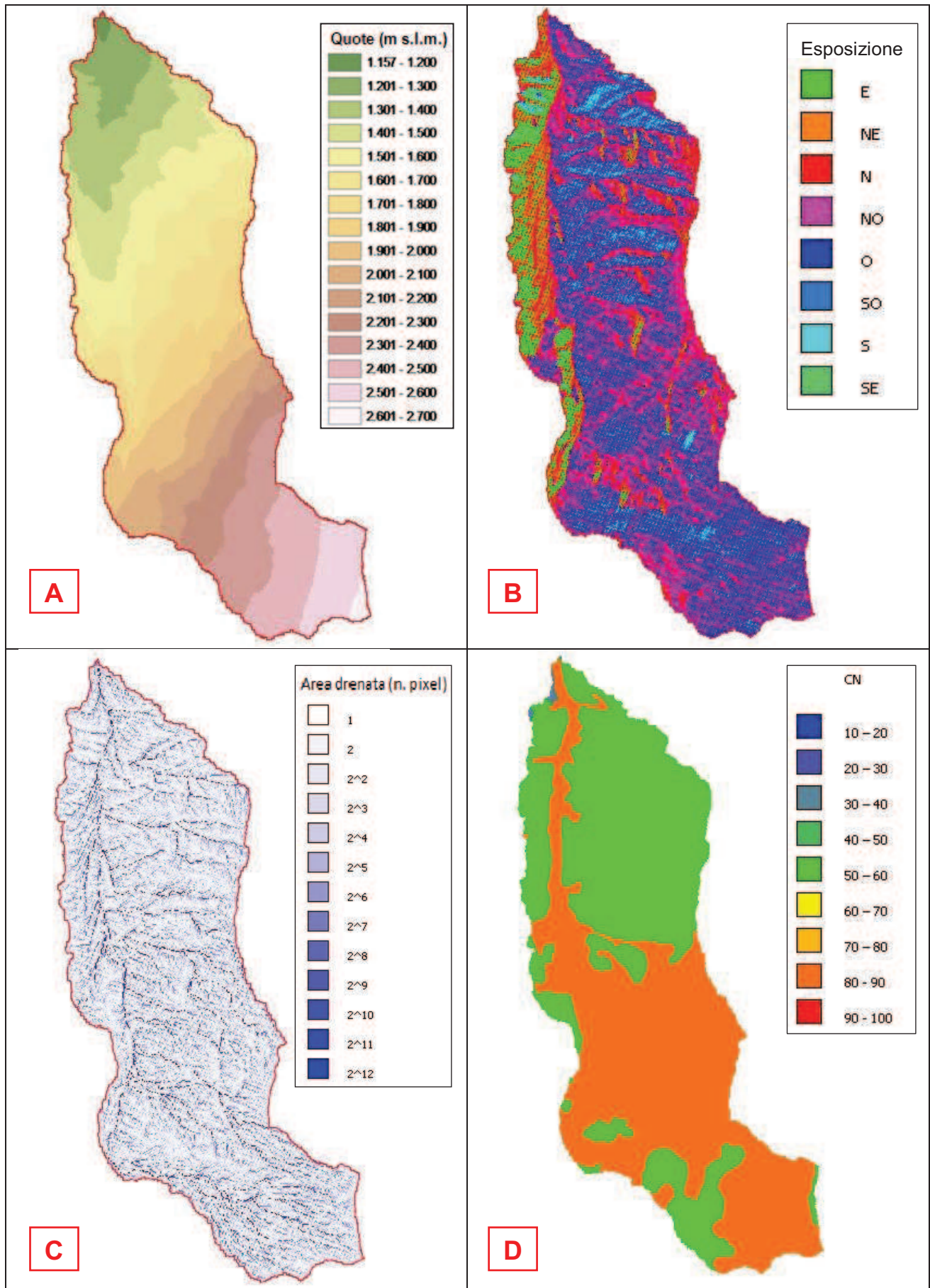


Figura 38 - Dem depittato, direzioni di deflusso, area drenata e CN del bacino in studio.

- **“Input pluviometrico”** che può essere, a seconda degli obiettivi:
 1. Modello puntuale: reperite le equazioni delle LSPP, riferite ad una determinata stazione, si inseriscono i parametri a e n dell'equazione $h=at^n$;
 2. Pioggia storica: viene fornita la serie temporale dei valori pluviometrici di un determinato evento pluviometrico “storico”;
 3. Modello distribuito: si differenzia dal Modello puntuale in quanto si fornisce al modello un file raster rappresentante i parametri a e n calcolati e distribuiti.
- **Altri parametri necessari al modello KLEM** per la simulazione sono: tipo di idrogramma e intervallo di input dei dati di precipitazione; intervallo di calcolo dell'idrogramma in uscita; condizioni di saturazione del suolo (AMC) considerate; portata di deflusso di base; perdite iniziali I_a e le velocità, su versante e reticolo.

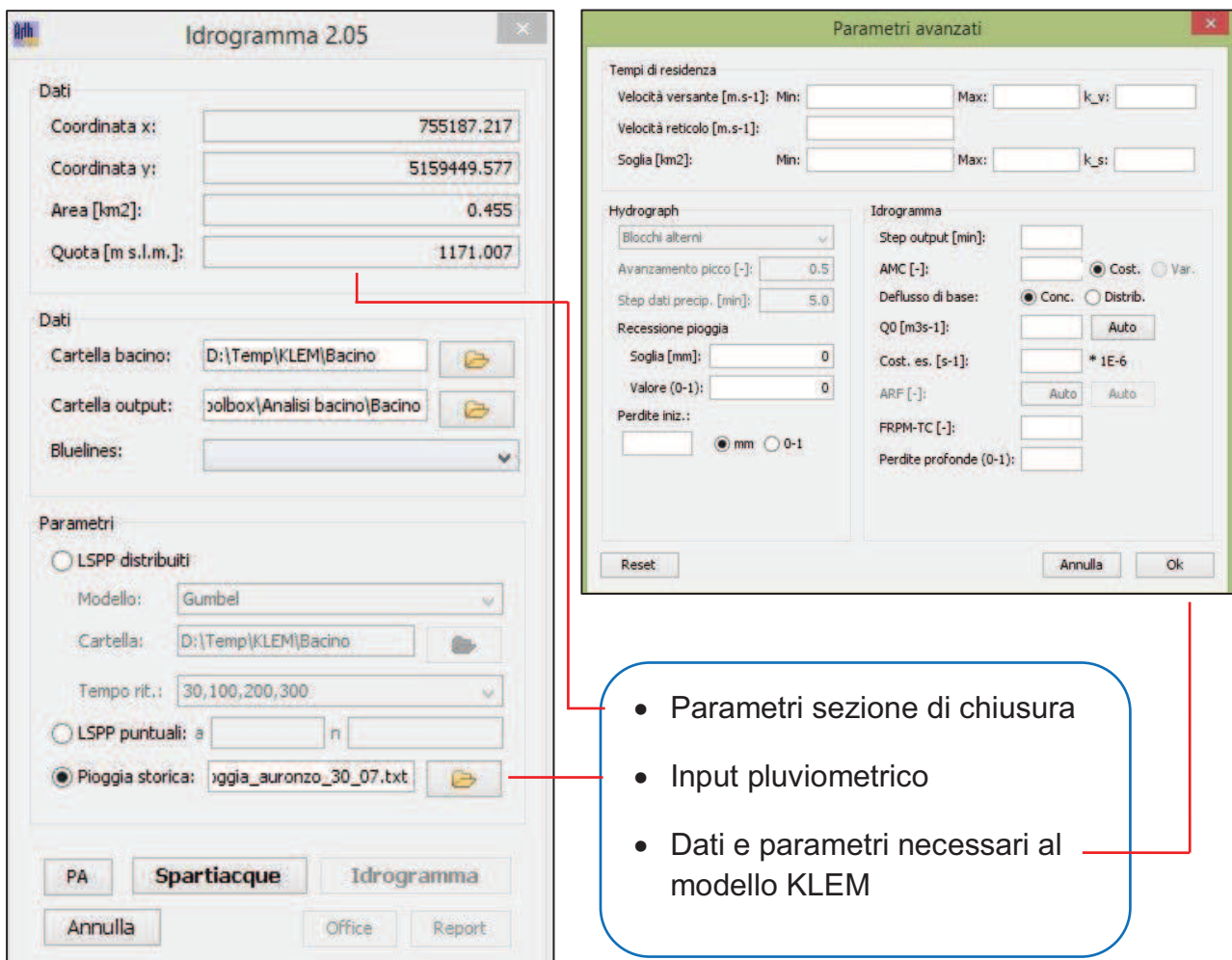


Figura 39 - Screenshot delle schermate relative al modello K.L.E.M. di Adb-ToolBox.

3.11 MODELLI NUMERICI DI SIMULAZIONE DI COLATE DETRITICHE

3.11.1 IL MODELLO NUMERICO BI-DIMENSIONALE FLO-2D

Il software di simulazione FLO – 2D, distribuito dalla *FLO – 2D Software Inc.*, è un modello bidimensionale sviluppato sia per la simulazione degli eventi di piena, sia per specifiche applicazioni nell’ambito della modellazione dei fenomeni di trasporto solido quali *bed-load* e *debris flow*.

Questo modello è basato su processi fisici in grado di combinare i modelli idrologici (entità di pioggia caduta, ruscellamento ed infiltrazione) con i modelli idraulici (effetti delle infrastrutture, ostruzioni al deflusso, variazioni velocità), al fine di delineare il rischio di inondazione ed essere uno strumento di supporto per la scelta dei processi di mitigazione appropriati. Può essere utilizzato sia per simulazioni monodimensionali (sono inseribili sezioni di varia forma, con scala di portata), sia per simulazioni di flusso non confinato su una piana, sia per simulazioni dell’impatto dell’inondazione sulle infrastrutture in base alla pressione e alla velocità del flusso (*Michelini, 2011*).

FLO-2D (sviluppato da O’Brien et al., 1993) è un modello idraulico bidimensionale che, a seconda degli obiettivi può essere a fondo fisso, nel caso di simulazione di colate detritiche o a fondo mobile, nel caso di simulazione di fenomeni di trasporto solido; viene utilizzato maggiormente per la simulazione di flussi non-Newtoniani in quanto, partendo da un’idrogramma di piena prevede l’area inondata, la velocità e lo spessore del flusso per ogni cella le cui caratteristiche morfologiche vengono determinate fornendo al software in input il modello digitale del terreno (DTM).

La superficie utilizzata dal modello per la simulazione del comportamento e deposito del flusso, definita “Dominio di calcolo”, viene suddivisa in un reticolo a maglie quadrate di nota quota (DTM), scabrezza (n di Manning) ed eventuale fattore di riduzione dell’area, usato per simulare il caso in cui elementi discreti nella piana di calcolo provocano l’ostruzione del flusso.

3.11.1.1 Teoria del modello

FLO-2D è un modello di conservazione del volume semplice nel quale, il volume di deflusso viene propagato in due modi leggermente differenti: da una serie di celle all’altra, per il deflusso sulla piana inondabile o lungo il “percorso-canale” per il deflusso in alveo. Per quanto concerne la corrente “fuori alveo”, questa viene controllata dalla topografia e

dalle resistenze al moto assunte per le diverse caratteristiche di scabrezza della singola cella oggetto di analisi.

La simulazione bidimensionale è effettuata, sia per inondazioni di acqua sia per quelle riguardanti il flusso di sedimenti, attraverso un'integrazione numerica delle equazioni della conservazione del volume [26] e del moto di un'onda dinamica, valutate lungo l'asse x [27] e lungo l'asse y [28]:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta t} + \frac{\Delta h u_x}{\Delta x} + \frac{\Delta h u_y}{\Delta y} \quad [26]$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\Delta h}{\Delta x} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\Delta V_x}{\Delta y} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\Delta V_x}{\Delta t} \quad [27]$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\Delta h}{\Delta y} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\Delta V_y}{\Delta x} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\Delta V_y}{\Delta t} \quad [28]$$

In cui:

- i = intensità della pioggia netta (m/s);
- h = profondità della corrente (m);
- S_o , S_{ox} e S_{oy} = pendenza del fondo e lungo gli assi x e y (m/m);
- V_x e V_y = componente della velocità media lungo gli assi x e y (m/s);
- S_{fx} = componente di dissipazione energetica lungo l'asse x;
- S_{fy} = componente di dissipazione energetica lungo l'asse y;

Le due equazioni che rappresentano le componenti di resistenza al moto si ottengono in funzione della pendenza di fondo, del gradiente di pressione e dei termini di accelerazione convettiva e locale.

Sebbene FLO-2D rappresenti un modello di deflusso multidirezionale, le equazioni di moto vengono applicate calcolando per ogni cella, la velocità media del flusso in una sola direzione. Esistono otto possibili direzioni di deflusso, quattro ortogonali (nord, est, sud e ovest) e quattro diagonali (nord-est, sud-est, sud-ovest e nord-ovest) e ogni velocità, per ciascuna possibile direzione di deflusso, viene calcolata indipendentemente dalle altre sette direzioni. La procedura di calcolo del deflusso definita *overland* comporta la determinazione del flusso che esce dai confini delle celle (nelle otto direzioni di deflusso potenziale) ed inizia con la stima della profondità della corrente sul confine della cella impiegando vari parametri idraulici quali velocità della corrente, coefficiente di scabrezza di Manning, area di deflusso, pendenza e quota del pelo libero.

La velocità della corrente nella piana alluvionale viene impiegata in due approcci definiti: approccio dell'onda diffusiva e approccio dell'onda dinamica.

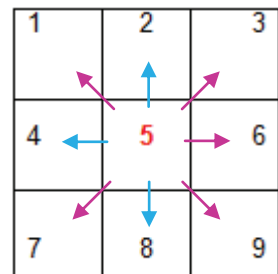
Inizialmente il modello utilizza il metodo dell'**onda diffusiva**, in cui la velocità viene determinata per ciascuna delle otto potenziali direzioni della corrente per ogni cella. Successivamente il software completa il calcolo utilizzando l'**onda dinamica**, dove la velocità calcolata con il metodo precedente, diventa una prima approssimazione nel metodo delle tangenti di secondo ordine di Newton – Raphson (*Raphson et al 1990*) per determinare le radici dell'equazione dell'onda dinamica.

Se la soluzione di Newton-Raphson fallisce il calcolo dopo tre iterazioni, l'algoritmo passa automaticamente all'utilizzo della sola soluzione diffusiva.

Successivamente, per tutte le otto direzioni della cella, la portata che fuoriesce viene calcolata moltiplicando la velocità per l'area della sezione trasversale di deflusso e, moltiplicando la somma delle portate per l'intervallo temporale si ottiene il volume netto defluito; questo volume viene poi diviso per la superficie dell'elemento della griglia per ottenere l'incremento o il decremento dell'altezza di deflusso Δh per ciascun intervallo temporale.

In riferimento alle convenzioni di segno indicate, la portata netta per la cella n°5 sarà [29]:

$$\sum Qx^{i+1} = Q_2 + Q_4 + Q_6 + Q_8 + Q_1 + Q_3 + Q_7 + Q_9 = Area_5 \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad [29]$$



3.11.1.2 CRITERI DI STABILITÀ NUMERICA

La chiave per ottenere un'efficiente procedura di simulazione consiste nei criteri di stabilità numerica che limitano l'ampiezza del passo temporale affinché, per ciascuna cella e ad ogni intervallo temporale, la soluzione del modello sia stabile. Il criterio di stabilità utilizzato da FLO-2D per la simulazione delle piane inondabili, canali e strade, consiste nell'applicazione della condizione di *Courant-Friedrich-Lewy* (CFL) che correla la velocità della corrente agli incrementi spaziali e temporali del modello. L'intervallo temporale è determinato con l'equazione [30]:

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta x}{(\beta \cdot V) + c} \quad [30]$$

dove:

C = numero di Courant ($C \leq 1.0$) preferibilmente assunto pari a 0.6 per la stabilità;

Δx = larghezza della cella;

β = coefficiente (uguale a 5/3 per canali larghi);

V = velocità media calcolata nella sezione trasversale;

c = velocità di propagazione dell'onda.

Per equazioni non lineari, potrebbe non essere possibile evitare completamente la diffusività artificiale o dispersione numerica assegnando il numero di Courant (Fletcher, 1990) pertanto, per risolvere la simulazione è necessario adottare un altro criterio di stabilità, sviluppato da Ponce e Theurer (1982). Questo criterio è funzione di un coefficiente empirico (ζ), della pendenza dell'alveo (S_0), della portata unitaria (q_0) e della dimensione degli elementi della griglia (Δx), secondo la seguente espressione [31]:

$$\Delta t < \frac{\zeta S_0 \Delta x^2}{q_0} \quad [31]$$

3.11.1.3 SIMULAZIONE DI MUD E DEBRIS FLOWS

Essendo dominato da sforzi viscosi e dilatanti, il movimento delle colate detritiche e fangose rappresenta un fenomeno molto diverso dal trasporto solido di fondo. Il comportamento di un *mudflow* è funzione di diversi fattori come le proprietà della matrice del flusso e della geometria, della pendenza e della scabrezza del canale di scorrimento. La matrice è costituita da acqua e da sedimenti fini e, ad alte concentrazioni i sedimenti fini alterano le proprietà del composto tra cui la densità, la viscosità e lo sforzo tangenziale.

Quando la simulazione interessa il trasporto iperconcentrato è importante identificare la corretta concentrazione dei sedimenti (C_{s-v}), ottenuta dalla seguente espressione [32]:

$$C_{s-v} = \frac{V_s}{V_{tot}} = \frac{V_s}{V_s + V_w} \quad [32]$$

Dove:

C_{s-v} = concentrazione solido-volumetrica dei sedimenti (-)

V_s = volume della componente solida del miscuglio (m^3)

V_w = volume della componente liquida (m^3)

Esprimendo la concentrazione solida in funzione del peso delle componenti (acqua e sedimenti) si ottiene la seguente equazione [33]:

$$C_{v-p} = \frac{C_w \gamma}{\gamma_s - C_v(\gamma_s - \gamma_w)} \quad [33]$$

In cui:

γ_w = peso specifico dell'acqua (kg/m^3)

γ_s = peso specifico dei sedimenti (kg/m^3)

Il peso specifico della miscela (γ_m) è in funzione della concentrazione di sedimenti in volume [34]:

$$\gamma_m = \gamma_w + C_{s-v}(\gamma_s - \gamma_w) \quad [34]$$

Di conseguenza, la densità della miscela viene definita come [35]

$$\rho_m = \rho_w + C_{s-v}(\rho_s - \rho_w) = \frac{\gamma_m}{g} \quad [35]$$

In cui il parametro "g" indica l'accelerazione di gravità = 9.81 m/s^2

Come già enunciato precedentemente, il software FLO-2D è in grado di simulare diversi tipi di fenomeni quali correnti iperconcentrate di fango (*mud-floods*), colate di fango e detritiche (*mud e debris flows*). La distinzione fondamentale tra questi eventi si basa sulla differente concentrazione solida, misurata in peso o in volume, del miscuglio che costituisce il flusso, come specificato in Tabella 11.

Tabella 11 - Comportamento dei flussi in funzione della concentrazione di sedimento (Julien e O'Brien, 2009).

	Cs-v	Cs-p	CARATTERISTICHE E COMPORTAMENTO DEL FLUSSO
MUDFLOW	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Deflusso evidente; colata di fango a lento scivolamento; deformazioni plastiche per l'azione del peso proprio; assenza di diffusione su superfici piane
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Deflusso in grado di diffondere su superfici piane; flusso coesivo
	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	Flusso che si mescola facilmente; mostra le proprietà dei fluidi in deformazione; si espande su superfici orizzontali, ma mantiene una superficie inclinata; presenza anche di particelle di grandi dimensioni; presenza anche di onde che dissipano rapidamente
MUDFLOOD	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Marcato assestamento di ghiaie e ciottoli; diffusione quasi completa sulla superficie orizzontale; sono distinguibili le due fasi del flusso; onde sulla superficie
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separazione dell'acqua sulla superficie; onde viaggiano facilmente; la maggior parte di sabbia e ghiaia si separa dal liquido e si muove per trasporto al fondo
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Moto ondoso distinto; fluido in superficie; tutte le particelle sono ferme sul fondo dell'alveo

Nei flussi quali *debris flows*, *mud flows* e *mudfloods*, lo sforzo tangenziale totale agente (τ_{tot}) può essere calcolato come somma di cinque componenti [36] ovvero: sforzo tangenziale critico τ_c ; sforzo tangenziale di Mohr-Coulomb τ_{mc} , dipendente dalla pressione tra i grani e dall'angolo di riposo del materiale; sforzo tangenziale viscoso τ_v ; sforzo tangenziale turbolento τ_t e sforzo tangenziale dispersivo τ_d .

$$\tau_{tot} = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad [36]$$

Tale equazione può essere rimaneggiata esprimendo lo sforzo tangenziale totale in funzione della velocità di deformazione del fluido $\left(\frac{dv}{dy}\right)$ (O'Brien e Julien, 1985):

$$\tau_{tot} = \tau_c + \tau_{mc} + \eta \left(\frac{dv}{dy}\right) + C \left(\frac{dv}{dy}\right)^2 \quad [37]$$

$$C = \rho_m l^2 + f(C_v, \rho_m) ds^2 \quad [38]$$

Il parametro C [38] rappresenta un coefficiente di sforzo tangenziale inerziale il quale dipende dalla densità del miscuglio ρ_m , dalla lunghezza di miscelamento di Prandtl l, dalla dimensione dei sedimenti d_s e da una funzione che lega la concentrazione volumetrica dei sedimenti con la densità del miscuglio ρ_m .

Per definire tutti i termini di sforzo tangenziale impiegati nel software, in analogia al lavoro di Meyer-Peter e Müller (1948) e Einstein (1950), l'equazione che definisce la tensione tangenziale complessiva è integrata sulla profondità di deflusso ed è riscritta nella seguente forma adimensionale [39]:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad [39]$$

Dove S_f è la pendenza di attrito totale, somma della pendenza della tensione S_y , della pendenza viscosa S_v e della pendenza turbolenta-dispersiva S_{td} . La pendenza viscosa può essere elaborata in funzione della velocità media del flusso v

$$S_v = \frac{K \eta}{8 \gamma_m} \cdot \frac{v}{h^2} \quad [40]$$

Il coefficiente di resistenza K è pari a 24 nel caso di canali rettangolari lisci ed ampi e cresce significativamente (anche fino a 50'000) con l'aumentare della scabrezza e dell'irregolarità della geometria della sezione trasversale (Tabella 12).

Il valore di K può essere automaticamente calcolato a partire dall'n di Manning, mentre la componente turbolenta-dispersiva si ottiene con l'equazione:

$$S_{td} = \frac{\eta_{td}^2 v^2}{h^{4/3}} \quad [41]$$

Tabella 12 - Parametri di resistenza per flussi laminari impiegati nel modello FLO-2D.

SUPERFICIE	RANGE DI K
Cemento/asfalto	24 – 108
Sabbia	30 – 120
Argilla nuda – suolo argilloso	100 – 500
Vegetazione sparsa	1000 – 4000
Erba bassa	3000 – 10000
Erba alta	7000 – 50000

Partendo dall'equazione [39], le componenti della pendenza di attrito possono essere combinate nella seguente equazione:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta v}{8 \gamma_m h^2} + \frac{\eta_{td}^2 v^2}{h^{4/3}} \quad [42]$$

Per la simulazione delle colate detritiche e fangose occorre dunque specificare la viscosità (η) e lo sforzo tangenziale (τ_y).

Se non sono disponibili le analisi reologiche del materiale costituente la colata, possono essere utilizzate le seguenti relazioni empiriche per il calcolo della viscosità η e dello sforzo tangenziale τ_y :

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad [43]$$

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad [44]$$

Dove α e β sono due coefficienti empirici definiti da *O'Brien e Julien (1988)* in seguito ad esperimenti di laboratorio come in Tabella 13. È inoltre necessario anche assegnare alla portata liquida una concentrazione volumetrica solida, o un volume.

Tabella 13 - Sforzo tangenziale critico e viscosità come funzioni della concentrazione di sedimento.

	$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$		$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$	
	α_2	β_2	α_1	β_1
da osservazioni "di campo"				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
da relazioni proposte in letteratura				
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29

3.11.2 IL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE RIVERFLO-2D

Il software di simulazione RIVERFLO-2D, distribuito dalla *Hidronia LLC*, è un modello bidimensionale impiegato nelle simulazioni degli eventi di trasporto solido fluviale e fondo mobile, nell'analisi dell'erosione spondale con associate strutture di protezione, per la modellazione del comportamento di sostanze inquinanti nei corpi idrici e per la modellazione e simulazione di trasporto solido "massivo" come *debris flows* e *mud flows*.

Tale modello idrodinamico si basa su 3 assunzioni fondamentali:

- 1) utilizzo di equazioni relative alle acque superficiali o poco profonde derivanti dall'integrazione verticale della equazione di *Navier-Stokes*. Pertanto il modello, non calcolando accelerazioni e velocità verticali, non è in grado di determinare soluzioni per i flussi secondari;
- 2) lo sforzo tangenziale di fondo del canale dipende dalla velocità media e dalla profondità del flusso;
- 3) il modello non include termini di dispersione energetica e turbolenza che vengono calcolati fornendo in input il valore di scabrezza (n di Manning) nelle equazioni di moto.

A differenza del software bidimensionale FLO-2D, in RIVERFLO-2D il dominio di calcolo è costituito da una geometria "*triangular mesh*" ovvero a mesh triangolare (TIN) che permette di ottenere maggiori risoluzioni nella rappresentazione del flusso idrico.

3.11.2.1 TEORIA DEL MODELLO

I flussi di acque poco profonde possono essere descritti matematicamente da equazioni relative alla conservazione del volume [45] e della quantità di moto [46] e [47] con tutte le relative ipotesi (*Vreugdenhil, 1994*), riportate in seguito:

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} + \frac{\Delta UH}{\Delta x} + \frac{\Delta VH}{\Delta y} = S \quad [45]$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} + U \frac{\Delta U}{\Delta x} + V \frac{\Delta U}{\Delta y} + g \frac{\Delta h}{\Delta x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho H} = 0 \quad [46]$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} + U \frac{\Delta V}{\Delta x} + V \frac{\Delta V}{\Delta y} + g \frac{\Delta h}{\Delta y} + \frac{\tau_{by}}{\rho H} = 0 \quad [47]$$

Δx e Δy sono le coordinate orizzontali; S è la risultante degli sforzi tangenziali insistenti

Δt è l'intervallo di tempo prescelto; U e V sono le velocità medie lungo gli assi x e y ;

H è la profondità dell'acqua; ρ è la densità dell'acqua.

Le componenti di S nelle tre direzioni sono:

$$S = [0, gh(S_{0x} - S_{bx}), gh(S_{0y} - S_{by})] \quad [48]$$

Dove g è l'accelerazione di gravità e S_{0x} e S_{0y} rappresentano la pendenza del letto alla quota di fondo pari a z_b [49] e [50]:

$$S_{0x} = -\frac{\Delta z b(x)}{\Delta x} \quad [49]$$

$$S_{0y} = -\frac{\Delta z b(y)}{\Delta y} \quad [50]$$

Le componenti relative agli incrementi di sforzi tangenziali relativi al fondo (S_{bx} e S_{by}) vengono calcolate utilizzando il coefficiente di scabrezza espresso con l' n di Manning (n) e l'altezza del tirante idrometrico (h):

$$S_{bx} = \tau_{bx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad [51]$$

$$S_{by} = \tau_{by} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad [52]$$

3.11.2.2 CONDIZIONI IDRODINAMICHE ESSENZIALI

Ci possono essere due principali tipi di condizioni idrodinamiche utilizzate in RIVERFLO-2D ovvero **Open boundary**, in cui il flusso può entrare e uscire dallo scenario di modellazione e **Close boundary**, in cui il flusso è limitato e circoscritto dal dominio di calcolo creando dei veri e propri "muri" che indirizzano il deflusso verso direzioni stabilite (Figura 40).

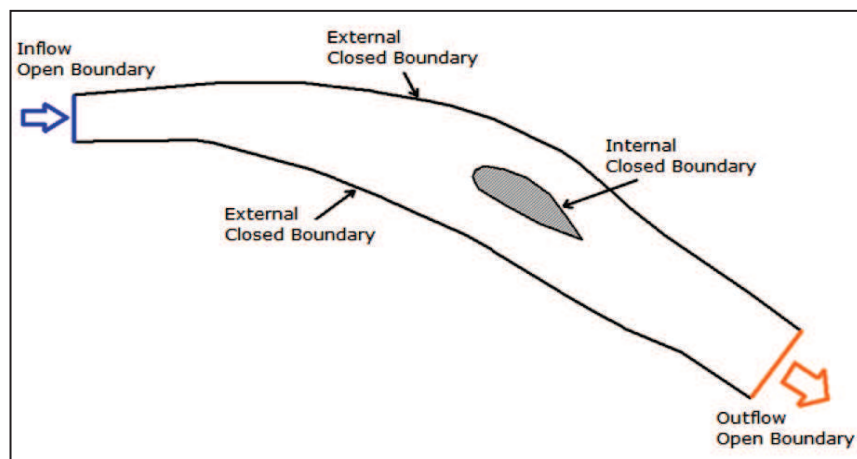


Figura 40 - Diverse condizioni idrodinamiche impiegate dal software RIVERFLO-2D.

Nella simulazione relativa ad eventi di colate detritiche si impiega la condizione "open boundary" in quanto il flusso è libero di transitare e depositarsi nel dominio di calcolo, senza "essere forzato" verso particolari vie di deflusso che ne modificherebbero il naturale comportamento.

RIVERFLO-2D permette di fornire un numero qualsiasi di celle di afflusso e deflusso, con varie combinazioni e condizioni e, solo l'uso appropriato di quest'ultime consente di ottenere una simulazione il più accurata possibile. Tali condizioni variano essenzialmente dal tipo regime idraulico della corrente che, a seconda dei casi può essere super-critico o sub-critico (Tabella 14).

Tabella 14 - Tipo di regime e parametri da fornire al modello per la condizione "open boundary".

Regime del flusso	Parametri da fornire alle celle <i>inflow</i>	Parametri da fornire alle celle <i>outflow</i>
Sub-critico	Portata o velocità	Valore del tirante idrico
Super-critico	Portata o altezza del tirante idrico	"Libero"

A seconda dei dati in input (portata liquida, velocità, altezza del tirante) viene fornita al modello la condizione idrodinamica stabilita, scegliendone una tra le possibili sette gestibili dal software e assegnandone il relativo *bc-type* come riportato in Tabella 15.

Tabella 15 - *Bc-type* possibili da fornire alle celle di *inflow*.

<i>Bc-type</i>	Descrizione parametro in input
1	Richiede l'altezza del tirante idrometrico della corrente
5	Richiede la portata liquida e la profondità della corrente
6	Converte la portata liquida in velocità, perpendicolare alla linea di confine dello scenario di calcolo
9	Impone un valore costante relativo alla portata
10	Libere condizioni di <i>inflow</i> e <i>out flow</i> . Velocità e tirante vengono calcolate automaticamente dal software
11	Libere condizioni di <i>inflow</i> e <i>out flow</i> . Velocità e tirante vengono calcolate autonomamente dal software ma SOLO riferite al flusso in uscita dal dominio di calcolo
12	Condizioni di <i>inflow</i> e <i>out flow</i> uniformi

Per le simulazioni condotte nel presente studio, disponendo come file di input della portata calcolata con il metodo idrologico alla sezione di chiusura del bacino, è stato dunque imposto come *bc-type* alle celle di *inflow* il codice 6.

Con questa condizione il programma calcola l'area di flusso e la velocità media dell'acqua corrispondente alla portata imposta, che può essere variabile nel tempo. Poi, la velocità è assegnare a ciascun nodo della maglia triangolare assumendo direzione perpendicolare alla linea di confine dello scenario di calcolo, come rappresentato in Figura 41.

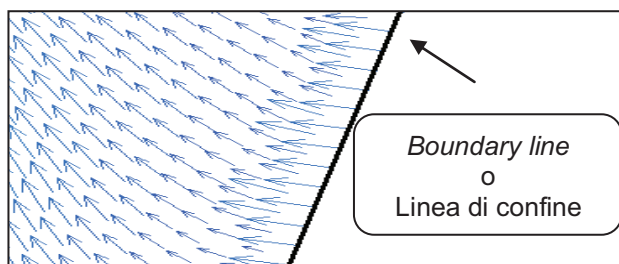


Figura 41 - Schema di funzionamento del codice "bc-type 6" assegnato al modello.

3.11.2.3 SIMULAZIONE DI MUD E DEBRIS FLOWS

Negli eventi di *mud e debris flow* la resistenza globale del flusso dipende fortemente dalle sollecitazioni di taglio derivanti da fonti diverse che includono lo stress viscoso, la tensione di snervamento, lo stress dispersivo e gli urti anelastici delle particelle solide all'interno della miscela fluida (Naef et al. 2006).

Il modello matematico sviluppato da Murillo & Garcia-Navarro (2012), consiste nella modellazione degli attriti-sforzi di fondo che possono variare dall'acqua pulita fino a miscele iperconcentrate di sedimenti. Il modello prevede le seguenti assunzioni:

- flusso orientato in senso prevalentemente orizzontale;
- flusso governato dall'equazione [45] con i termini di attrito come spiegati in seguito;
- miscela di acqua e sedimenti descritta utilizzando il metodo continuo e assumendo la stessa velocità sia del liquido che per la fase solida;
- letto del fiume non erodibile;
- liquido con proprietà costanti: ad esempio densità, elasticità, ecc

La formulazione reologica di RIVERFLO-2D comprende diverse condizioni di attrito che rappresentano una grande varietà di fluidi non-newtoniani iperconcentrati. In tale formulazione, il termine attrito nell'equazione [45] viene sostituito dalla profondità media e quindi, le equazioni che descrivono le forze tangenziali possono essere raggruppate nella stessa formula matematica. In questo modo, diversi sforzi tangenziali, (turbolenti, dispersivi, frizionali, viscosi e di snervamento) possono essere considerati e impiegati per simulare un'ampia gamma di flussi composti da fango e detriti.

A seconda del tipo di flusso simulato, il software necessita di una serie di dati in input che, come mostrato nello "screenshot esemplificativo" di Figura 42 possono variare da: scabrezza (n di Manning) viscosità, angolo di attrito interno della colata, densità e sforzi tangenziali generati dal flusso.

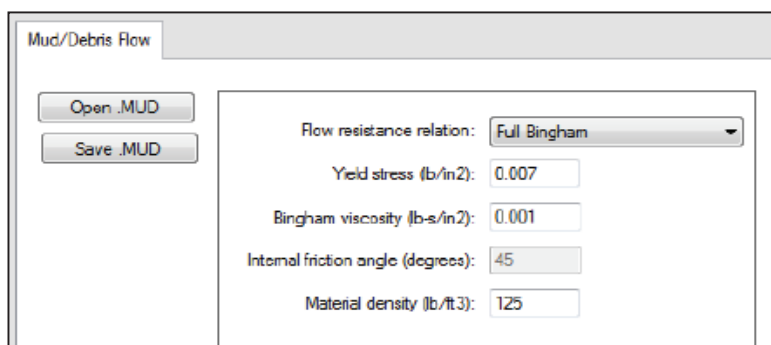


Figura 42 - Screenshot esemplificativo della schermata *mud/debris flow* del software.

3.11.3 VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DEI MODELLI

La valutazione dell'accuratezza delle simulazioni effettuate ed il confronto tra i due software (FLO-2D e RIVERFLO-2D) con il deposito reale di campo sono stati condotti seguendo il metodo proposto da Scheidl e Rickenmann (2010). Essi valutano l'accuratezza di previsione sovrapponendo le zone di deposito simulate dai modelli con quelle osservate realmente in campo. Da questa sovrapposizione si ottengono le tre sotto-aree X, Y e Z (Figura 43): la prima è l'area simulata dal modello in modo esatto (positiva); la seconda è l'area NON simulata dal modello ma interessata dall'evento (mancante); la terza è l'area simulata dal modello ma non interessata dall'evento (eccedente). Dal rapporto tra le tre sotto-aree e la zona di deposizione osservata si ricavano tre diversi tipi di accuratezza:

- **Accuratezza positiva (α):**

$$\alpha = \frac{B_x}{B_{osservato}} \quad [53]$$

Dove B_x è la sottoarea x e $B_{osservato}$ è l'area di deposizione realmente rilevata in campo.

- **Accuratezza negativa (β):**

$$\beta = \frac{B_y}{B_{osservato}} \quad [54]$$

Dove B_y è la sottoarea y.

- **Accuratezza mancante (γ):**

$$\gamma = \frac{B_z}{B_{osservato}} \quad [55]$$

Dove B_z è la sottoarea z.

Poiché il miglior grado di accuratezza tra le aree di deposito simulate e quelle osservate è descritto da alti valori di α e bassi valori di β e γ , l'accuratezza complessiva (δ) è stata calcolata attraverso il rapporto tra l'accuratezza positiva e la somma tra accuratezza negativa e accuratezza mancante:

$$\delta = \frac{\alpha}{\beta + \gamma} \quad [56]$$

Esprimendo l'accuratezza complessiva in percentuale, più il suo valore si avvicina a 100, maggiore è la corrispondenza tra le aree di deposito simulate e quelle osservate.

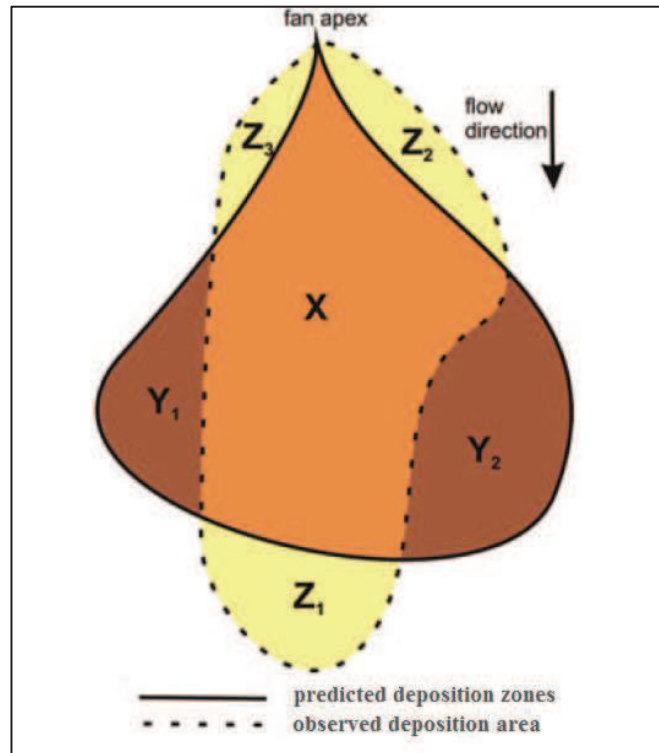


Figura 43 - Identificazione delle tre sottoree X, Y e Z tramite la sovrapposizione dell'area simulata e quella osservata (da Scheidl e Rickenmann, 2010).

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Nel presente capitolo vengono riportati i risultati ottenuti in seguito alle analisi eseguite sui dati rilevati “in campo” (analisi granulometrica, analisi della vegetazione e stima del volume depositatosi in conoide a seguito all’evento) e della modellazione idrologica e numerica, e relativa al *debris flow* di studio.

4.1 RISULTATI DELLA STIMA DEI VOLUMI

La stima del volume complessivo depositatosi nell’area conoidale del bacino oggetto di studio a seguito dell’evento del 30 luglio 2012, è stato eseguito attraverso due modalità: a) effettuando un rilievo topografico di campo, annotando anche gli spessori di deposito medi, ed effettuando delle interpolazioni in ambiente GIS, e b) attraverso approccio idrologico a partire dalle precipitazioni registrate durante l’evento.

4.1.1 APPROCCIO DI CAMPO CON ELABORAZIONE GIS

Il rilievo topografico ha permesso di determinare la superficie totale del deposito, pari a 34'129.74 m², essenziale successivamente al calcolo del volume totale e dello spessore medio del conoide in analisi.

Vengono di seguito riportati i risultati ottenuti dal primo approccio impiegato per la stima degli spessori e dei volumi eseguita in seguito alle elaborazioni GIS impiegando i dati rilevati in campo.

Dall’interpretazione dei valori di spessore e volume emersi da tali operazioni, si nota un’elevata somiglianza tra i risultati ottenuti, con una con una deviazione standard (σ) calcolata pari a 299.13 m³ per la valutazione dei volumi e pari a 0.008 m per la valutazione degli spessori. Tra i tre procedimenti analizzati si nota che il metodo dell’*Inverse Distance Weighted* (IDW) si discosta leggermente dai risultati ottenuti utilizzando i metodi dei poligoni di Thiessen e del *Topo to raster*, essendo tra i tre metodi il più complesso sia dal punto di vista grafico che operativo; necessita infatti di una precisa calibrazione di ogni singolo parametro impiegato nell’elaborazione, al fine di ottenere un risultato più corretto possibile.

Vengono riportati infine in Tabella 16 i risultati, ottenuti con i metodi sopracitati al fine di pervenire ad un valore univoco sia per spessore che per volume del materiale depositatosi nell’area conoidale del bacino in seguito all’evento di *debris flow* del 30 luglio 2012.

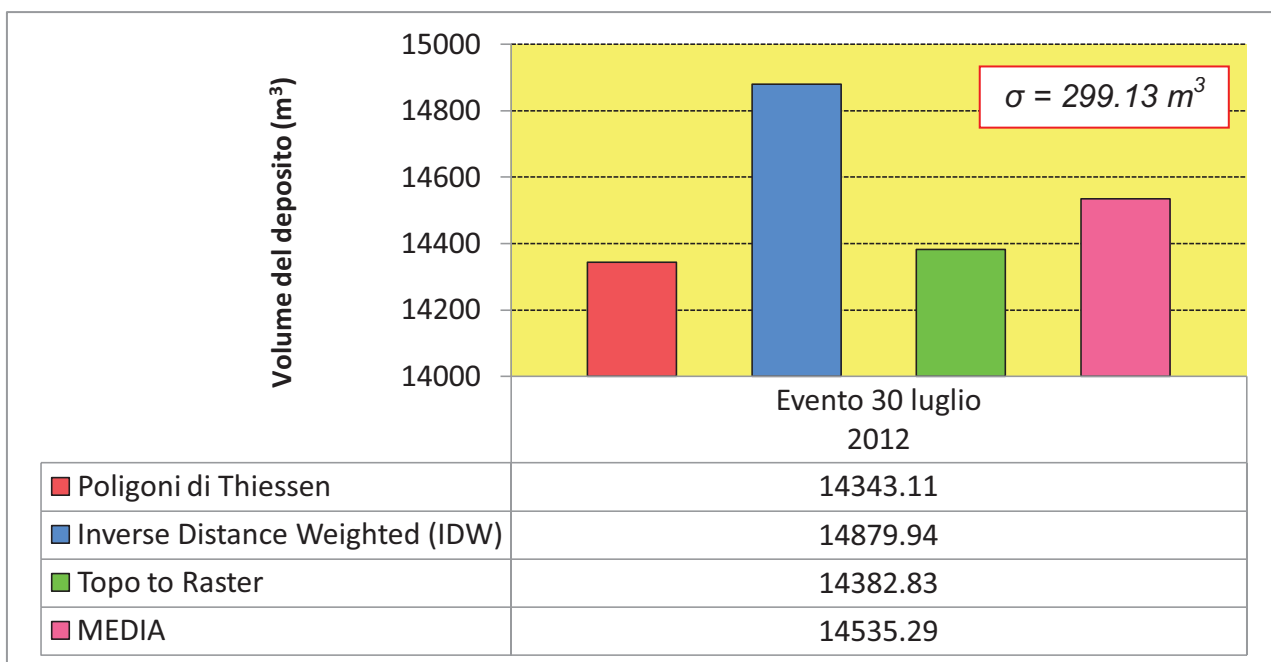
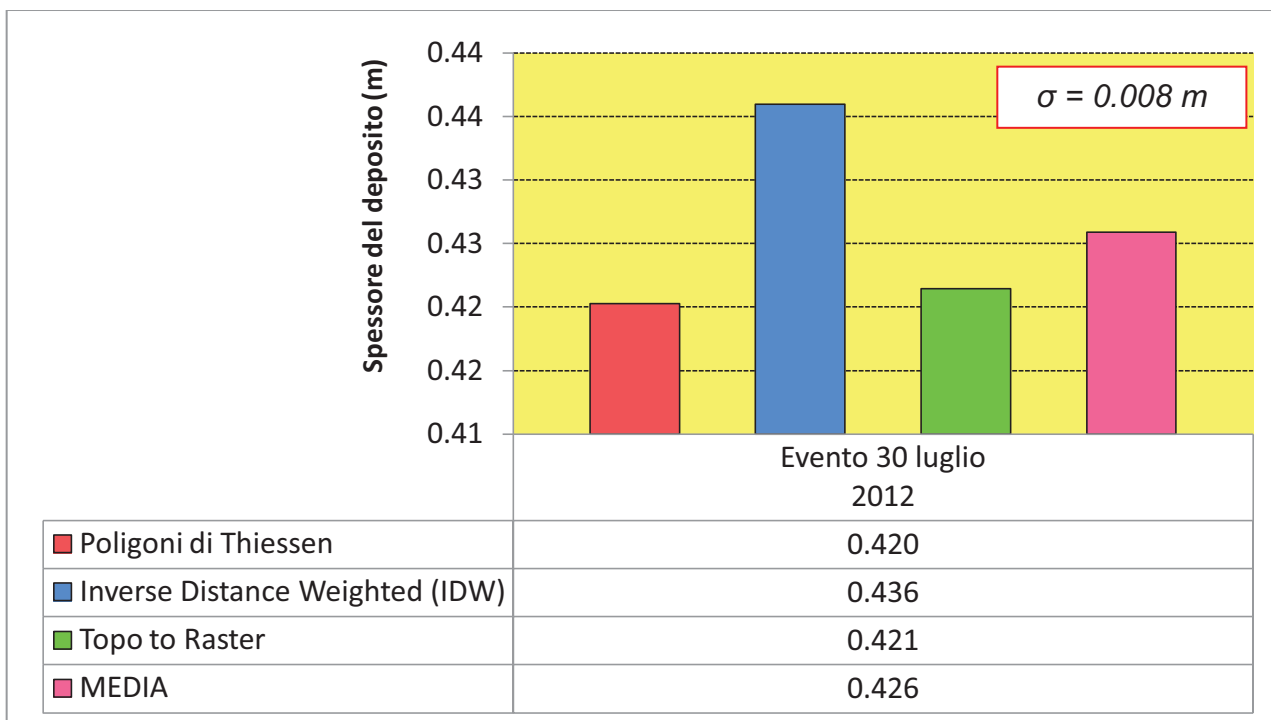


Figura 44 - Grafici riassuntivi rappresentanti spessori e volumi medi del deposito.

Tabella 16 - Calcolo degli spessori medi e volumi medi del conoide.

Metodo di calcolo	Spessore (m)	Superficie (m ²)	Volume (m ³)
Poligoni di Thiessen	0.420	34'129.74	14'343.11
<i>Inverse Distance Weighted</i>	0.436		14'879.94
<i>Topo to raster</i>	0.421		14'382.83
VALORE MEDIO	0.426		14'535.29

4.1.2 MODELLAZIONE IDROGRAMMA LIQUIDO E *DEBRISGRAMMA* DI COLATA

La simulazione o modellazione dello scenario idrologico è molto importante in quanto, la determinazione dell'idrogramma liquido generatosi in seguito all'estremo evento meteorico del 30 luglio 2012, costituisce il punto di partenza per le successive elaborazioni atte alla definizione dell'idrogramma di colata o "*debrisgramma*" e alla stima del volume solido coinvolto nell'evento di colata depositatosi nell'area conoidale del bacino oggetto di studio. La ricostruzione di entrambi gli idrogrammi stata condotta utilizzando i dati pluviometrici, relativi all'evento considerato registrati dalla stazione ARPAV sita in località "Auronzo", la cui posizione e coordinate geografiche sono rappresentate in Figura 45.

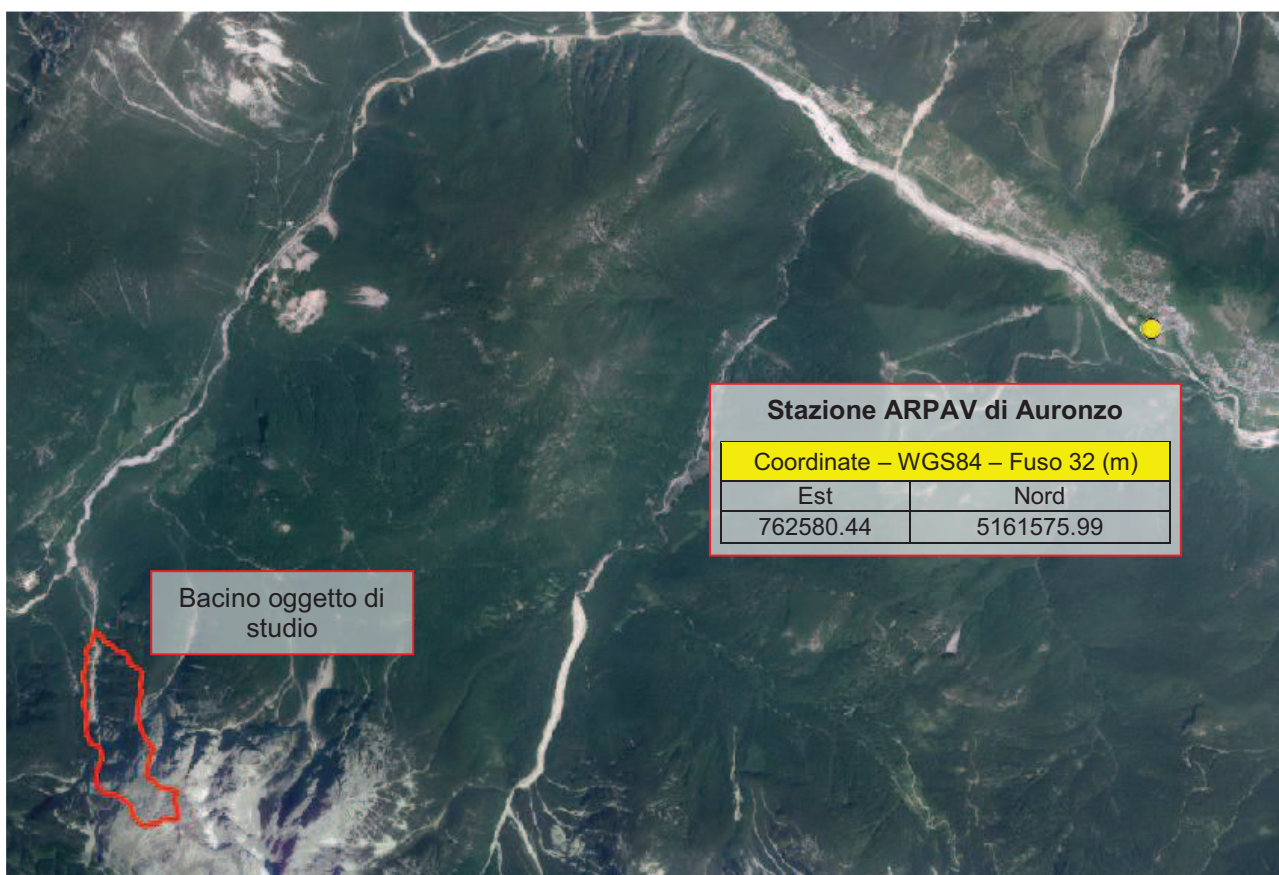


Figura 45 - Ortofoto con indicazione della Stazione ARPAV di "Auronzo" e del bacino in studio.

Dall'analisi dei valori di precipitazione registrati dalla stazione meteorologica è stato possibile riportare i valori (discretizzati ad intervalli temporali di 5, 10, 15, 30 e 60 minuti) e il conseguente idrogramma di precipitazione relativo all'evento che il 30 luglio 2012 ha generato una colata detritica nel bacino oggetto di studio. Successivamente si è poi proceduto alla determinazione dell'idrogramma liquido impiegando il modello di simulazione K.L.E.M implementato nel software GIS AdB ToolBox, utilizzando i parametri idrologici di input riportati in Tabella 18

Tabella 17 - Analisi evento meteorico del 30 luglio 2012.

Data e ora		Pioggia rilevata					
		mm/5'	mm/10'	mm/15'	mm/30'	mm/h	mm tot
30 luglio 2012	17.35	0.0	0.2	0.8	10.6	43.0	43.2
	17.40	0.2					
	17.45	0.6	1.4				
	17.50	0.8					
	17.55	2.0	9.0	9.8			
	18.00	7.0					
	18.05	6.2	23.6	29.0			
	18.10	17.4					
	18.15	5.4	7.2		32.4		
	18.20	1.8					
	18.25	0.8	1.6	3.4			
	18.30	0.8					
	18.35	0.2	0.2	0.2			
	18.40	0.0					

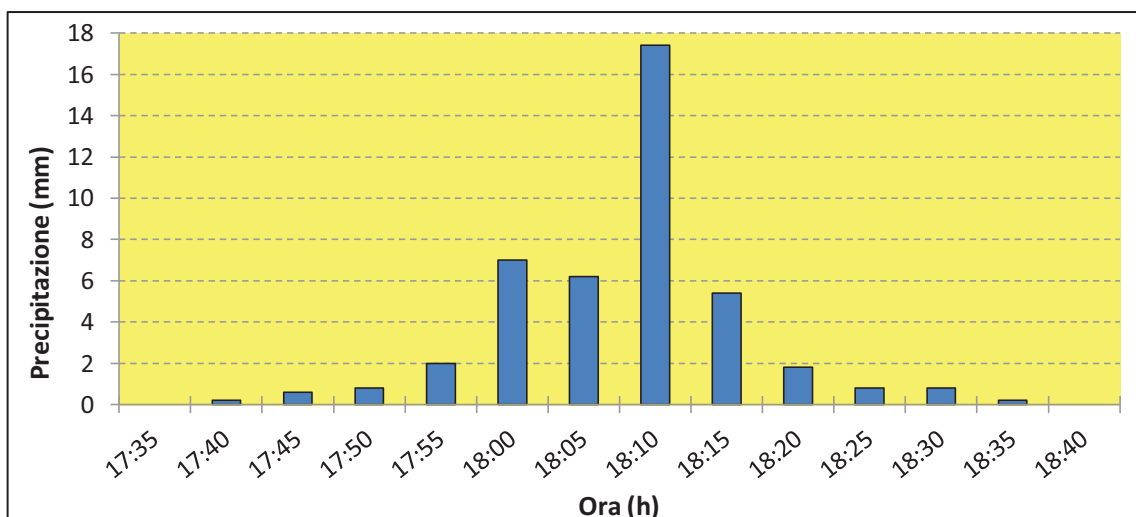


Figura 46 - Ietogramma evento meteorico del 30 luglio 2012.

Una volta definito l'idrogramma liquido riferito alla sezione di chiusura del bacino, si può determinare l'idrogramma solido-liquido della colata in due differenti modi, utilizzando il metodo volumetrico proposto da Takahashi (1991) oppure, sempre utilizzando tale metodo, adottare le modifiche proposte da D'Agostino e Marchi (2004).

Tabella 18 - Parametri avanzati di input forniti al software AdB ToolBox per la simulazione dell'evento.

Tipo idrogramma	Step in e out idrogramma (min)	AMC	Perdite iniziali (0-1)	Q_0 (m^3/s)	Cost. esaurimento (s^{-1})	Vel. reticolo (m/s)	Vel. max. versante (m/s)	Soglia (ha)	FRPM-TC
Blocchi alterni	5	3	0.1	0	6.0	2.0	0.3	0.01	0.9

4.1.2.1 METODO D'AGOSTINO-MARCHI PER LA DETERMINAZIONE DEL DEBRISGRAMMA

Vengono riportati debrisgramma (Figura 47) e risultati (Tabella 19) ottenuti utilizzando il metodo di Takahashi (1991) e modificato in un secondo momento da D'Agostino e Marchi (2004) assumendo la concentrazione volumetrica dei sedimenti variabile da 0.200 (minimo) a 0.585 (massimo) per rappresentare più correttamente il naturale comportamento della colata.

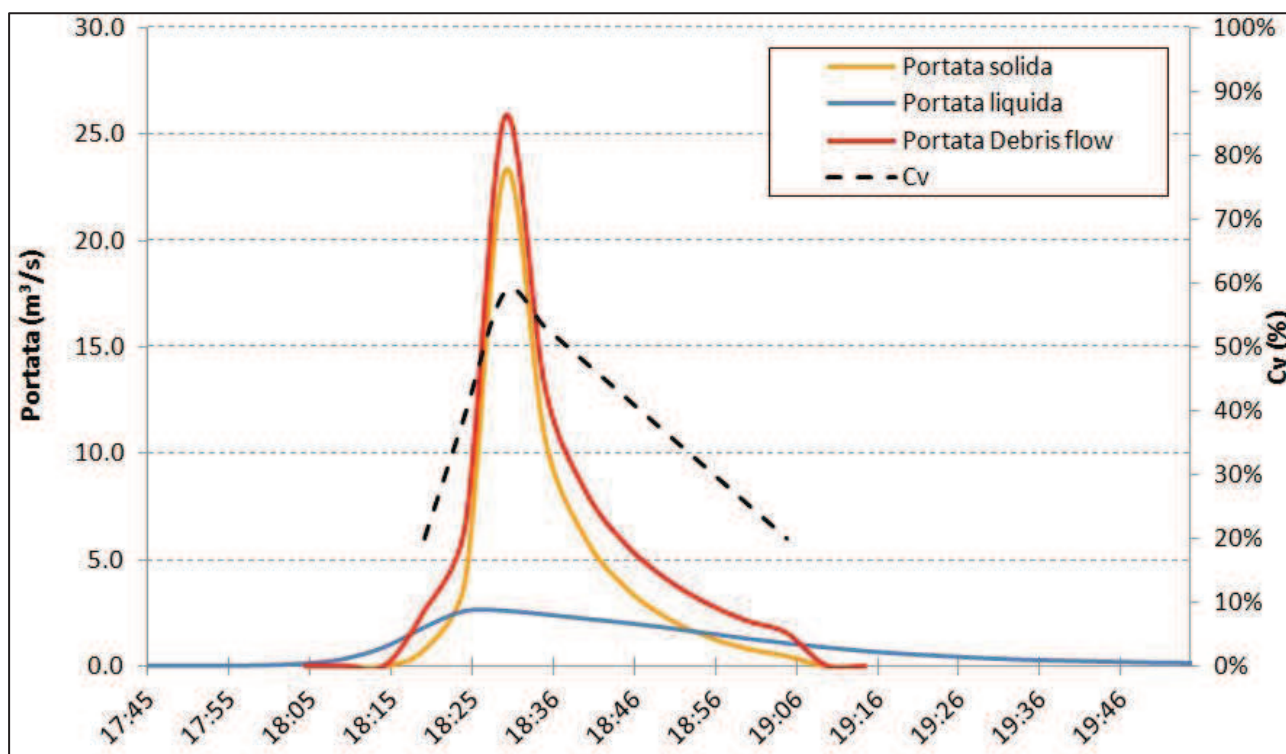


Figura 47 - Idrogramma solido-liquido del debris flow calcolato con metodo D'Agostino-Marchi.

Tabella 19 - Valori e volumi dell'idrogramma solido-liquido del debris flow calcolati con metodo D'Agostino-Marchi.

Ora	Portate liquide (m³/s)			Csv (t)	Portate solide (m³/s)	
	Totale	Diretta	Base		Q solida	Q tot colata
18:20	1.813	1.689	0.124	0.220	0.81	2.62
18:25	2.573	2.446	0.127	0.403	3.92	6.49
18:30	2.584	2.456	0.128	0.585	23.26	25.84
18:35	2.406	2.277	0.129	0.530	10.63	13.03
18:40	2.215	2.087	0.129	0.475	6.01	8.23
18:45	2.021	1.893	0.128	0.420	3.69	5.71
18:50	1.796	1.668	0.128	0.365	2.30	4.10
18:55	1.542	1.404	0.127	0.310	1.41	2.95
19:00	1.288	1.161	0.127	0.255	0.83	2.12
19:05	1.068	0.942	0.126	0.200	0.47	1.54

Volumi calcolati (m³)		
Volume Liquido	Volume Solido	Volume Totale
6526.50	15997.54	21789.34

4.1.2.2 METODO FLO-2D PER LA DETERMINAZIONE DEL DEBRISGRAMMA

Tale metodo consente di determinare l'idrogramma solido-liquido di colata (Figura 48) imponendo una concentrazione solido-volumetrica costante lungo tutta la durata dell'evento, non permettendo di rappresentare il naturale comportamento dei debris flow e ottenendo risultati di volumi poco attendibili (Tabella 20).

Nonostante ciò, si è deciso di calcolare il debrisgramma dell'evento anche con tale metodo per poter confrontare i risultati dei modelli di simulazione FLO-2D e RIVERFLO2-D in quanto il modello numerico bidimensionale *RIVERFLO-2D* non permette di simulare il comportamento delle colate imponendo una concentrazione volumetrica dei sedimenti variabile ma solamente costante durante tutta la durata dell'evento.

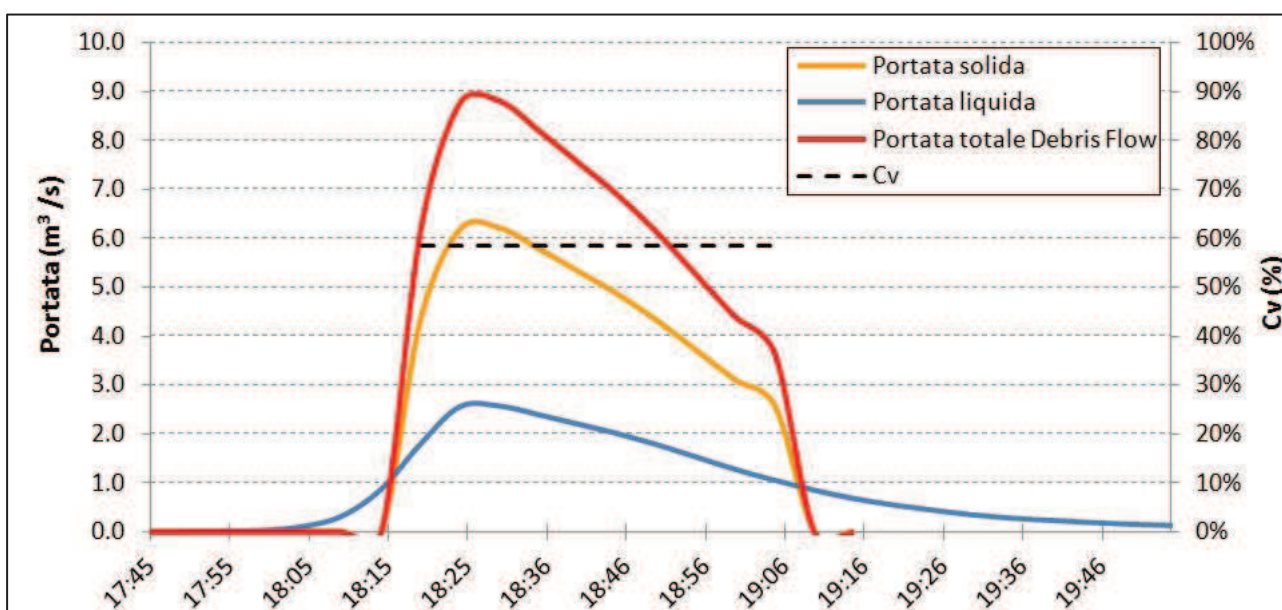


Figura 48 - Idrogramma solido-liquido del debris flow verificatosi il 30 luglio 2012 calcolato con metodo FLO-2D.

Tabella 20 – Valori e volumi relativi all'idrogramma solido-liquido del debris flow calcolati con metodo FLO-2D.

Ora	Portate liquide (m ³ /s)			Csv (t)	Portate solide (m ³ /s)	
	Totale	Diretta	Base		Q solida	Q tot colata
18:20	1.813	1.689	0.124	0.585	4.37	6.18
18:25	2.573	2.446	0.127	0.585	6.20	8.77
18:30	2.584	2.456	0.128	0.585	6.227	8.811
18:35	2.406	2.277	0.129	0.585	5.80	8.20
18:40	2.215	2.087	0.129	0.585	5.34	7.55
18:45	2.021	1.893	0.128	0.585	4.87	6.89
18:50	1.796	1.668	0.128	0.585	4.33	6.12
18:55	1.542	1.404	0.127	0.585	3.72	5.26
19:00	1.288	1.161	0.127	0.585	3.10	4.39
19:05	1.068	0.942	0.126	0.585	2.57	3.64

Volumi calcolati (m ³)		
Volume Liquido	Volume Solido	Volume Totale
6526.50	13956.14	19747.94

4.2 RILIEVI GRANULOMETRICI

L'analisi granulometrica è stata eseguita al fine di determinare le caratteristiche granulometriche del sedimento depositato ed il probabile comportamento reologico della colata detritica in studio. I rilievi sono stati eseguiti in due aree del deposito detritico: una nella parte intermedia ed una nella parte finale.

4.2.1 RILIEVO GRANULOMETRICO N.1

Il rilievo nella parte intermedia è stato eseguito in data 19 luglio a quota 1030 m s.l.m. a monte della strada silvo-pastorale in sinistra idrografica del Torrente Ansiei (Figura 49). Di seguito sono riportate le distribuzioni di frequenza relativa e cumulate e i diametri caratteristici (Figura 50) e (Tabella 21).



COORDINATE RILIEVO GRANULOMETRICO 1 (m)	
WGS 84 – Fuso 32 – EPGS: 32632	
X	Y
755148.26	5159887.35



Figura 49 - Area del rilievo granulometrico n.1 a monte della strada silvo-pastorale e relative coordinate.

Tabella 21 - Dati elaborati e diametri caratteristici del rilievo granulometrico n.1.

Classi (mm)	classi ϕ	Numerosità del campione	Frequenza relativa (%)	Frequenza cumulata (%)
8.00	-3.00	3	1.31	1.31
11.00	-3.46	9	3.93	5.24
16.00	-4.00	19	8.30	13.54
22.60	-4.50	29	12.66	26.20
32.00	-5.00	38	16.59	42.79
45.00	-5.49	43	18.78	61.57
64.00	-6.00	42	18.34	79.91
90.00	-6.49	27	11.79	91.70
128.00	-7.00	14	6.11	97.82
180.00	-7.49	2	0.87	98.69
256.00	-8.00	3	1.31	100.00

	ϕ_x	D_x (mm)
D_5	-2.97	7.8
D_{10}	-3.23	9.4
D_{16}	-3.60	12.1
D_{30}	-4.11	17.3
D_{50}	-4.70	25.9
D_{60}	-4.94	30.7
D_{70}	-5.22	37.2
D_{84}	-5.68	51.2
D_{90}	-5.84	57.4
D_{95}	-6.26	76.5

Dm	-5.52	45.9
-----------	--------------	-------------

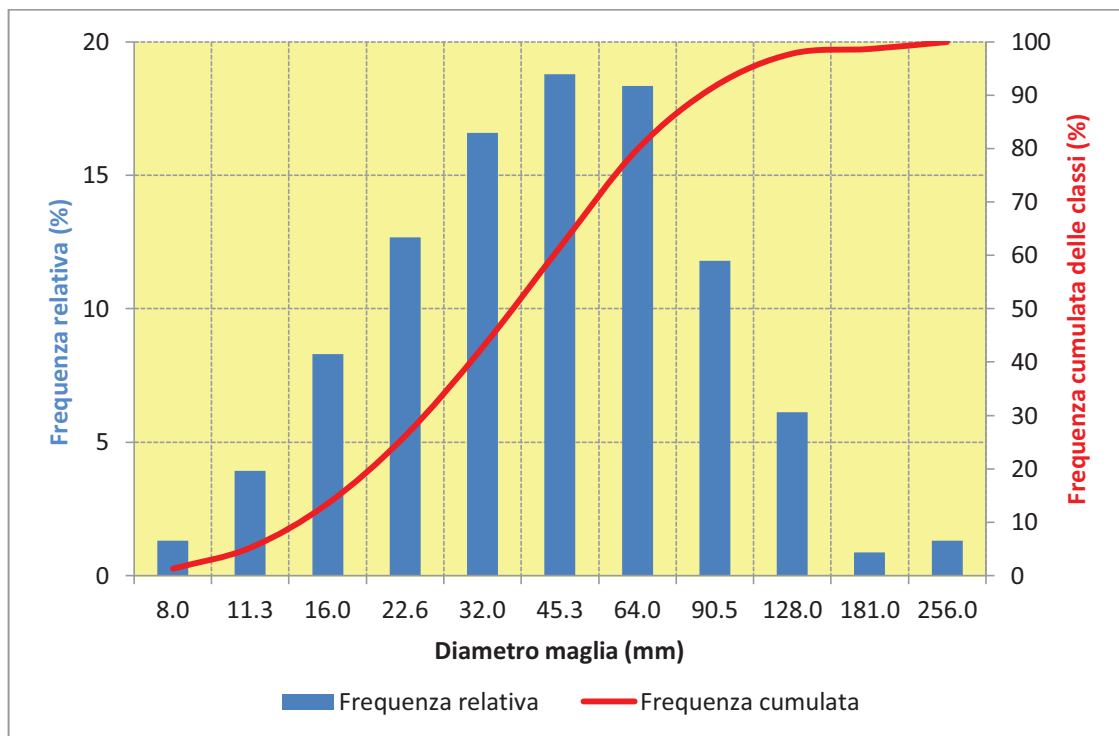


Figura 50 - Frequenza relativa e cumulata delle classi diametriche del rilievo 1.

Dai valori dei diametri caratteristici (Tabella 21), dai grafici sulle frequenze relative e cumulate diametriche (Figura 50) e dai valori dei coefficienti e indici granulometrici riportati in Tabella 22, si può desumere che il sedimento è poco classato o assortito, non uniforme e con una prevalenza verso la matrice grossolana.

Tabella 22 - Coefficienti e indici del rilievo granulometrico n.1.

Parametro	Valore	Note
Coefficiente di uniformità U	3.30	Distribuzione poco ampia
Indice di gradazione G	2.60	
Deviazione standard geometrica σ_g	2.06	Sedimento non uniforme
Deviazione standard σ	17.00	Assortimento poco classato
Coefficiente di asimmetria s (<i>skewness</i>)	0.38	Asimmetrica verso il grossolano
Coefficiente di appuntimento o curtosi	0.23	

4.2.2 RILIEVO GRANULOMETRICO N.2

Il rilievo granulometrico n.2 è stato eseguito anch'esso in data 19 luglio 2013 nella zona di fine del deposito a quota 1025 m s.l.m. (Figura 51). In seguito sono riportate le distribuzioni di frequenza relativa e cumulate e i diametri caratteristici (Figura 52) e (Tabella 23).



COORDINATE RILIEVO GRANULOMETRICO 2 (m)	
WGS 84 – Fuso 32 – EPGS: 32632	
X	Y
755234.25	5159931.01



Figura 51 - Area del rilievo granulometrico n.2 alla fine del deposito e relative coordinate.

Tabella 23 - Dati elaborati e diametri caratteristici del rilievo granulometrico n.2.

Classi (mm)	classi ϕ	Numerosità del campione	% classe	% cumulata
4.00	-2.00	4	3.23	3.23
5.60	-2.49	6	4.84	8.06
8.00	-3.00	18	14.52	22.58
11.00	-3.46	14	11.29	33.87
16.00	-4.00	20	16.13	50.00
22.60	-4.50	22	17.74	67.74
32.00	-5.00	18	14.52	82.26
45.00	-5.49	0	0.00	82.26
64.00	-6.00	0	0.00	82.26
90.00	-6.49	16	12.90	95.16

	ϕ_x	D_x (mm)
D_5	-1.69	3.23
D_{10}	-2.04	4.11
D_{16}	-2.25	4.76
D_{30}	-2.84	7.17
D_{50}	-3.46	11.00
D_{60}	-3.78	13.76
D_{70}	-4.07	16.85
D_{84}	-5.57	47.65
D_{90}	-5.80	55.84
D_{95}	-5.99	63.73

Dm	-4.77	27.30
-----------	-------	--------------

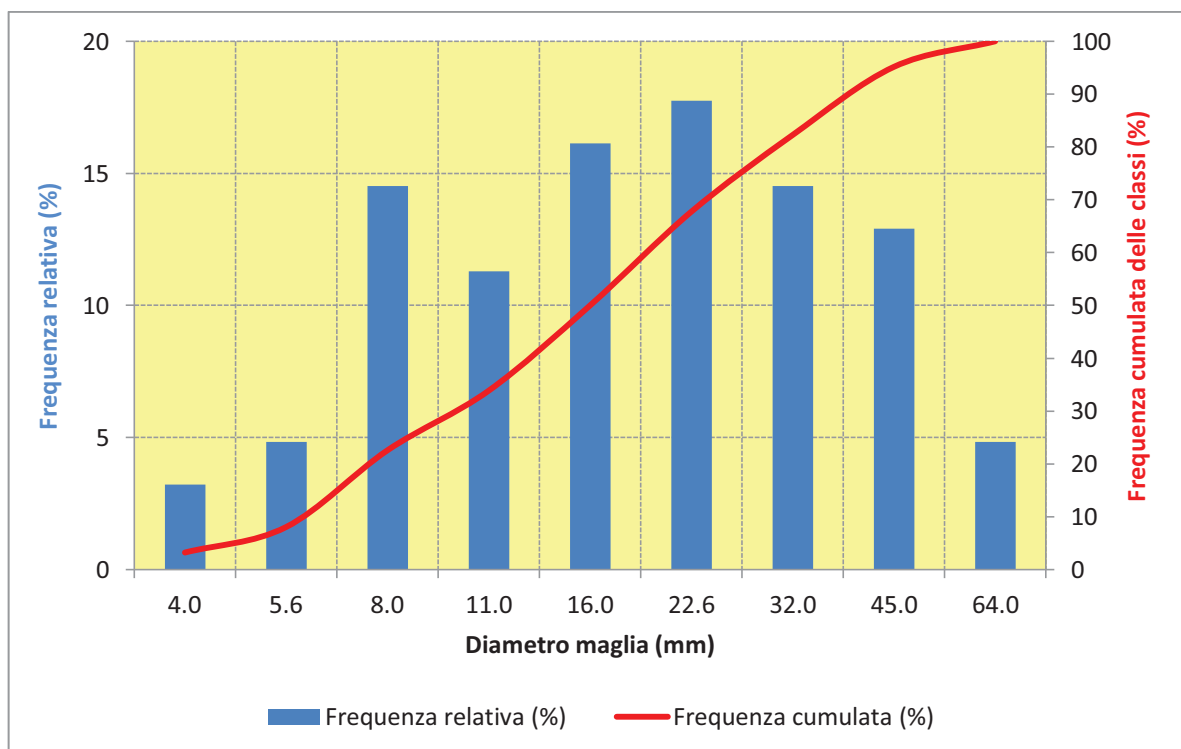


Figura 52 - Frequenza relativa e cumulata delle classi diametriche del rilievo n.2.

Anche in questo caso, dai valori dei diametri caratteristici (Tabella 23), dai grafici sulle frequenze relative e cumulate diametriche (Figura 52) e dai valori dei coefficienti e indici granulometrici riportati in Tabella 24 si può desumere che il sedimento è poco classato o assortito, non uniforme ma, a differenza del “prelievo granulometrico 1” con una prevalenza verso la matrice medio-fine.

Tabella 24 - Coefficienti e indici del rilievo granulometrico 2.

Parametro	Valore	Note
Coefficiente di uniformità U	3.30	Distribuzione poco ampia
Indice di gradazione G	3.32	
Deviazione standard geometrica σ_g	3.16	Sedimento non uniforme
Deviazione standard σ	18.6	Assortimento poco classato
Coefficiente di asimmetria s (<i>skewness</i>)	0.78	Asimmetrica verso il grossolano
Coefficiente di appuntimento o curtosi	0.21	

Dall'analisi granulometrica eseguita per entrambe le aree di campionamento è emersa una caratterizzazione granulometrica composta da una **matrice moderatamente grossolana**. Questa, secondo quanto stabilito da Moscariello et al. (2001), dopo aver condotto numerose analisi granulometriche sui depositi di colate detritiche nelle Alpi Italiane, rientra nel grande gruppo di **colate di tipo dolomitico** (confermato dalla presenza nel bacino della sola componente geolitologica della Dolomia Principale) dal comportamento reologico definito "**macroviscoso**".

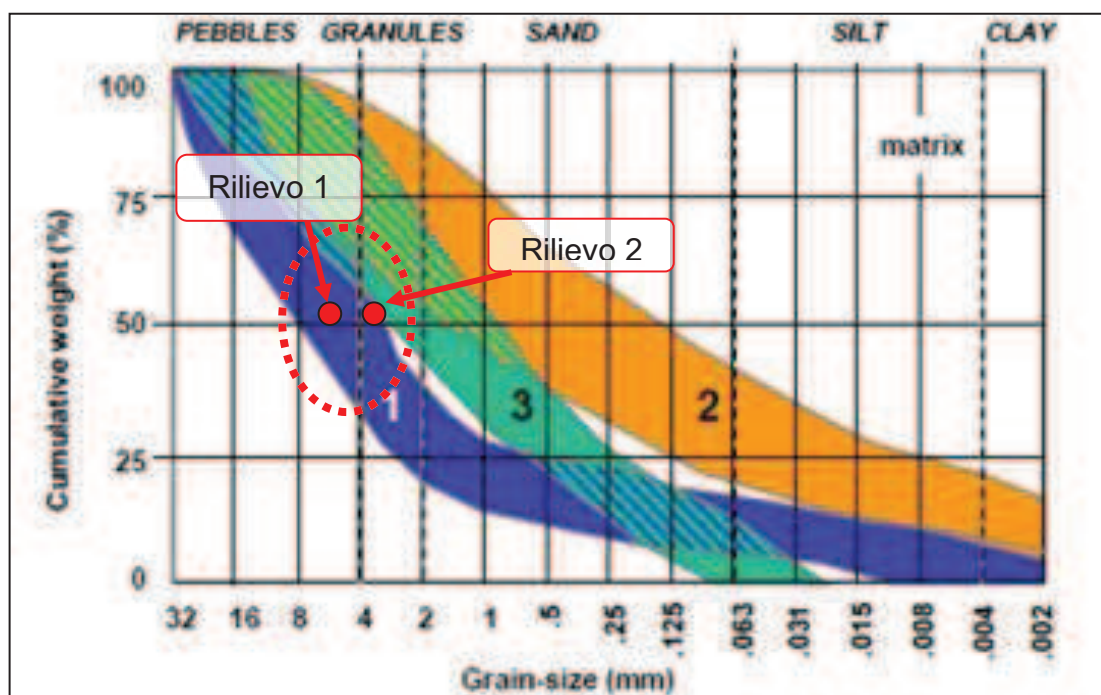


Figura 53 - Geologia correlata alla frequenza cumulata e alla granulometria dei depositi di colata per i due campioni granulometrici (Moscariello et al., 2001).

4.3 RISULTATI DEI RILIEVI VEGETAZIONALI

L'obiettivo del seguente capitolo consiste nell'evidenziare le differenze, sia quantitative che qualitative, evidenti nelle cosiddette aree "disturbate" e "non disturbate" dal fenomeno di colata detritica.

Tale operazione è stata possibile rilevando le caratteristiche dendrometriche (specie, diametro e densità) e sanitarie (danni/lesioni e stato vegetativo) del popolamento, in modo da poter determinare la severità riconducibile al passaggio del *debris flow*.

Sono state dunque individuate 4 aree vegetate distinguendole in "non disturbate" e "disturbate", quest'ultime comprendenti l'intera vegetazione nel deposito ed interessate dunque dal passaggio/impatto della colata detritica (Figura 54). Sono inoltre state confermate le formazioni forestali precedentemente individuate "dall'analisi GIS", ovvero dei Piceo-Faggeti con una minoranza di Pino silvestre (*Pinus sylvestris*).

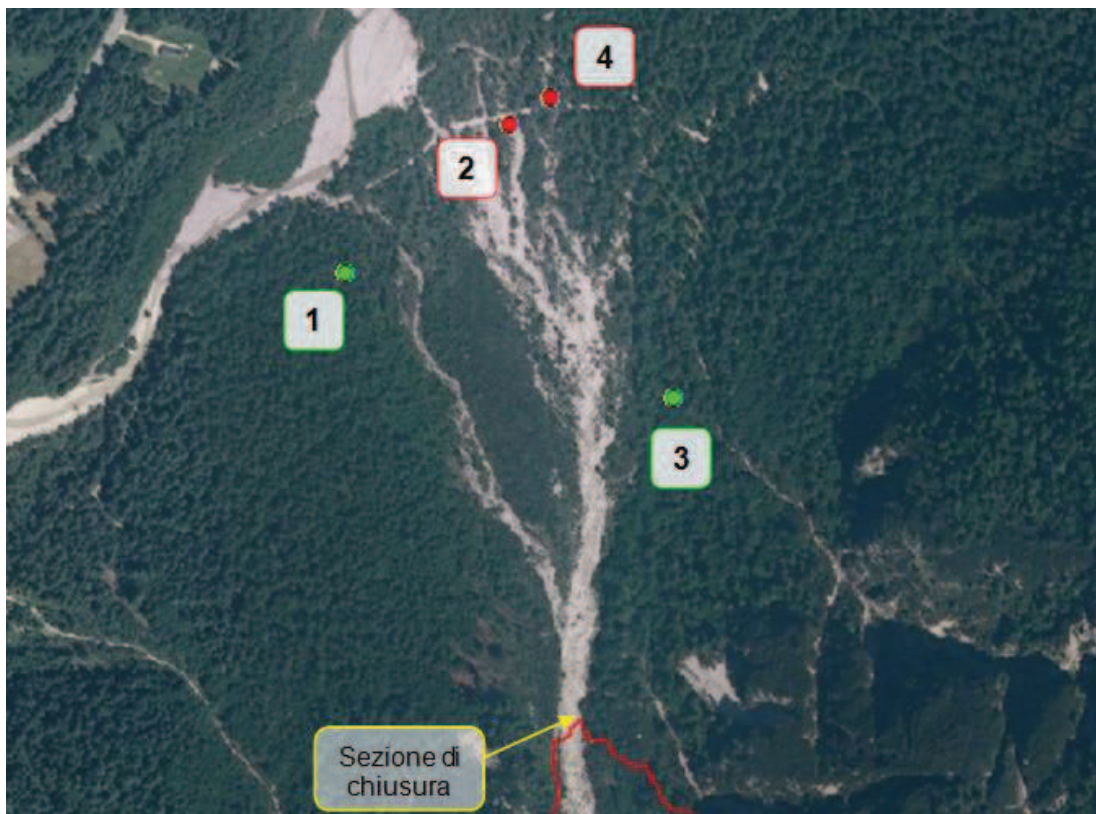


Figura 54 - Ortofoto 2012 con indicazione delle aree di saggio rilevate.

4.3.1 AREA DI SAGGIO “NON DISTURBATE”

- AREA n.1

Nel conoide alluvionale del bacino di studio, al di fuori delle aree interessate dalla deposizione del materiale detritico, sono state scelte in modo casuale 2 aree di saggio al fine di caratterizzare il soprassuolo forestale “non disturbato”.

L'area di saggio n.1 è stata eseguita circa 150 m ad ovest rispetto al deposito e all'interno della fitta area boscata estesa sul versante nord-ovest alla base della Croda Alta di Somprade in sinistra idrografica (Figura 56). In seguito ai rilievi, in quest'area è stata determinata la presenza delle sole popolazioni di Abete rosso (*Picea abies*) e Faggio (*Fagus sylvatica*); in particolare, come evidente in Figura 55 e Tabella 25, si nota la netta dominanza dell'Abete rosso, con circa il 60% degli individui e area

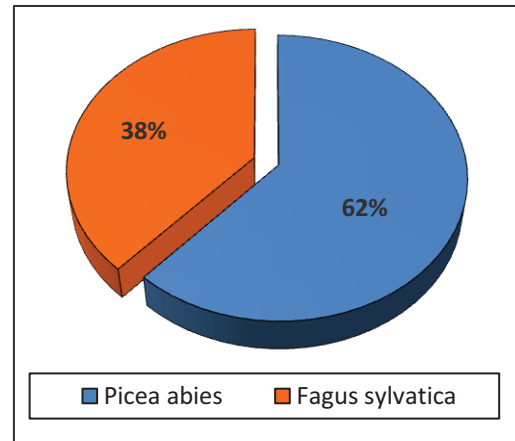


Figura 55 - Frequenza specie area saggio 1

basimetrica nettamente superiore rispetto al Faggio (Figura 57). Questo, conferma la tendenza strutturale dell'Abete rosso, di rapida affermazione ed accrescimento verticale, nell'essere una specie dominante nei confronti del Faggio che, causa la competizione con la flora spontanea del sottobosco, il brucamento ad opera degli animali selvatici e soprattutto, causa la scarsa disponibilità di luce (ridotta dall'effetto “filtro” dell'Abete rosso), viene relegato al piano dominato, contraddistinto dalla grande prevalenza di ceppaie, con numerosi individui di natura pollonifera (10-15 polloni) dai diametri esigui.



Figura 56 - Foto dell'area di saggio n.1

Dal punto di vista diametrico, viste le componenti forestali presenti sono stati rilevati diametri medi relativamente bassi, pari a 14.5 cm relativi all'abete rosso e di 6.5 cm relativi al faggio, con un diametro medio complessivo dell'area di saggio di 11.9 cm. Molto probabilmente a causa di un fenomeno di disturbo naturale antico o a causa di un passato intervento antropico a fini di utilizzazione forestale. Non si registrano danni o lesioni agli individui riconducibili ai fenomeni trattati nella presente tesi.

Tabella 25 - Caratteristiche area di saggio n.1

Area 1 - NON disturbata							
Specie	n. nell'AdS	n. ad Ha	% nell'AdS	Diametro medio (cm)	Area basimetrica nell'AdS (m ²)	Area basimetrica ad Ha (m ²)	Note
<i>Fagus sylvatica</i>	39	1241	38.24	6.5	0.6	17.7	5 ceppaie; 31 polloni; 8 matricine.
<i>Picea abies</i>	63	2005	61.76	14.5	1.1	33.7	
	102	3247	100.00	11.9	1.7	51.4	

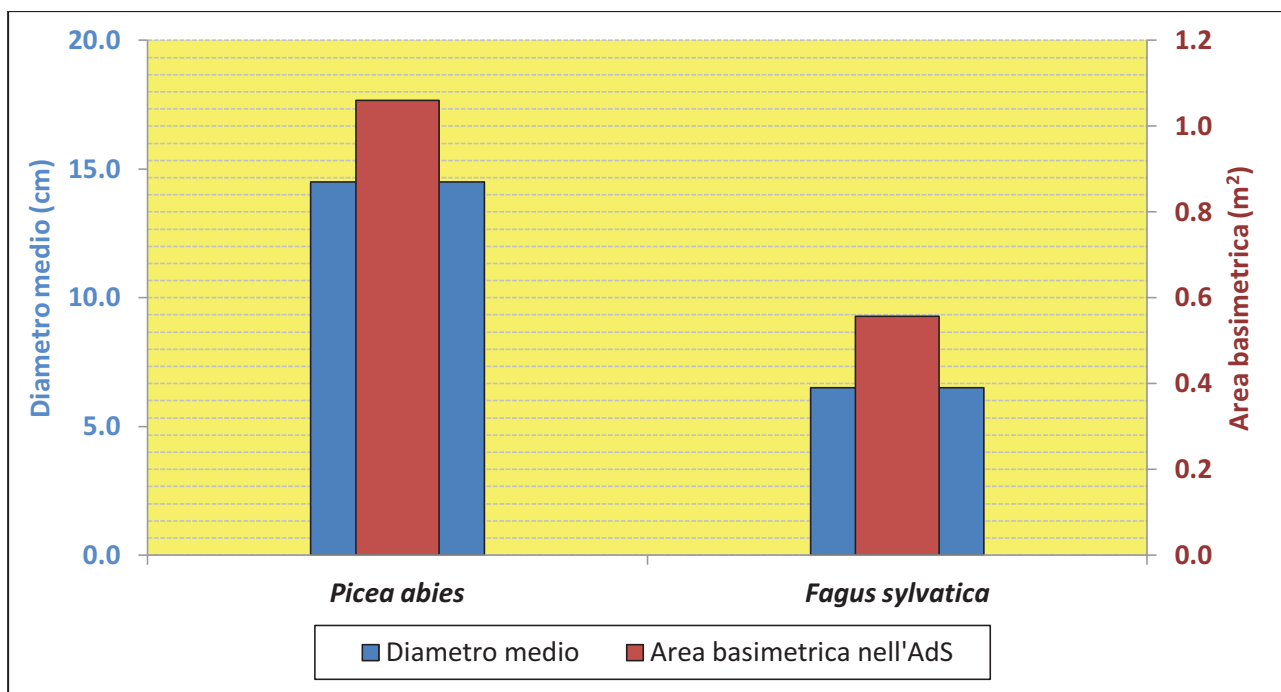


Figura 57 - Diametro e area basimetrica specie area di saggio n. 1

- **AREA n.3**

L'area di saggio n.3 è stata eseguita nel versante nord-est della Croda Alta di in destra idrografica (Figura 59).

In questa area è stata osservata la presenza di una maggiore eterogeneità specifica, sono state infatti censite le specie: abete rosso (*Picea abies*), acero (*Acer campestre*), faggio (*Fagus sylvatica*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*) e ontano (*Alnus glutinosa*), è evidente la grande prevalenza, dell'abete rosso (38%) e del faggio (42%) con dinamiche ecologico-evolutive analoghe all'area 1 e già descritte in precedenza (Figura 58).

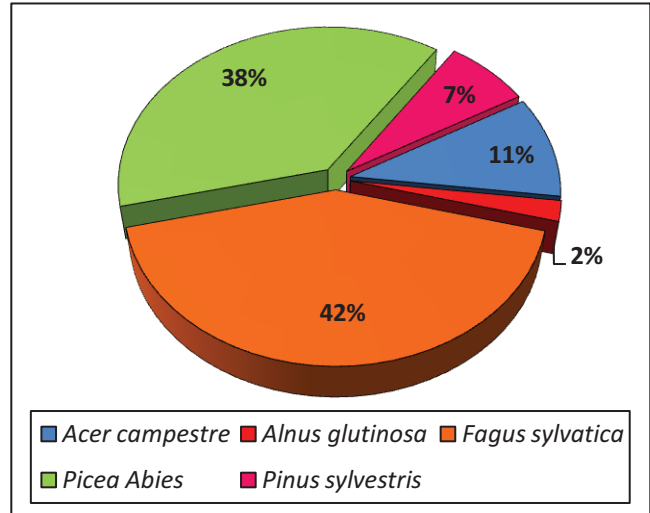


Figura 58 - Frequenza specie area saggio 3

Particolare attenzione merita la presenza di individui vetusti, di diametri considerevoli di *Pinus sylvestris* (Figura 60), che riflette una passata affermazione e crescita di tale specie, grazie alla sua natura pioniera, che per molti anni ha ricoperto il ruolo di "specie dominante" nel versante. Con il trascorrere del tempo però le formazioni tipiche del sito quali abete rosso e faggio stanno lentamente subentrando e nel lungo periodo, eccetto eventi naturali e antropici di disturbo, tenderanno a modificare la composizione e struttura del popolamento fino al raggiungimento dello stadio ecologico "climax" per le categorie forestali dei piceo-faggeti insistenti in tutta la dorsale nord del Gruppo delle Marmarole.



Figura 59 – Individui di *Pinus sylvestris* presenti nell'area n.3

Per quanto riguarda l'acero e l'ontano, la loro presenza è associabile, oltre alla grande capacità di diffusione e affermazione del loro semenzale e alla loro resistenza a stress idrici e termici, soprattutto alla presenza nell'area in studio di suoli acidi e umidi, tipici degli abieteti dei versanti montuosi alpini esposti a nord.

Considerando le caratteristiche diametriche, stati rilevati diametri medi relativamente omogenei ed analoghi all'area n.1, pari a 18 cm dell'Abete rosso e 6.8 cm relativi al faggio, con un diametro medio complessivo dell'area di saggio di 12.89 cm che risente fortemente della presenza dei grandi diametri del Pino silvestre (Tabella 26).

Come nell'area n.1 non si registrano danni o lesioni agli individui riconducibili ai fenomeni trattati nella presente tesi.

Tabella 26 - Caratteristiche area di saggio n.3

Area 3 - NON disturbata							
Specie	n. nell'AdS	n. ad Ha	% nell'AdS	Diametro medio (cm)	Area basimetrica nell'AdS (m ²)	Area basimetrica ad Ha (m ²)	Note
<i>Acer campestre</i>	10	318	10.31	8.4	0.1	2	
<i>Alnus glutinosa</i>	2	64	2.06	5.0	0.01	0	
<i>Fagus sylvatica</i>	41	1305	42.27	6.8	0.2	5	6 ceppaie; 25 polloni; 16 matricine.
<i>Picea abies</i>	37	1178	38.14	18.0	1.2	39	
<i>Pinus sylvestris</i>	7	223	7.22	30.1	0.6	18	
	97	3088	100.00	12.89	2.0	65	

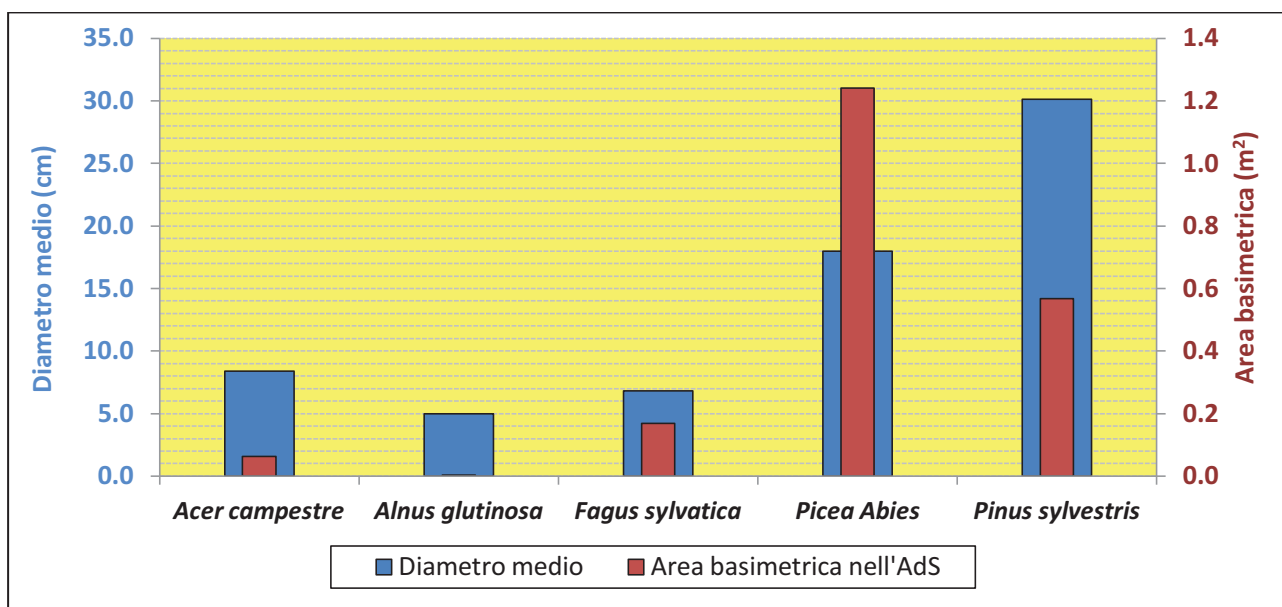


Figura 60 - Diametro e area basimetrica specie area di saggio n. 3

4.3.2 AREA DI SAGGIO “DISTURBATE”

Le aree di saggio relative alla vegetazione coinvolta nel fenomeno di impatto, scorrimento ed arresto della colata detritica sono state eseguite nell'area conoidale del bacino in esame, rilevando gli individui arborei ed arbustivi sviluppati all'interno del deposito generato dal *debris flow* del 30 luglio 2012.

Dal punto di vista vegetazionale è evidente, sia visivamente che numericamente (vedi Figura 61) una grandissima differenza di specie rispetto alle precedenti aree non coinvolte direttamente dal fenomeno; in quest'area dominano infatti le specie “pioniere” (circa l'70% degli individui) quali, Pino mugo (*Pinus mugo*), Pino silvestre (*Pinus sylvestris*) e Salice (*Salix caprea*), essendo specie tipiche del processo di evoluzione definito “successione primaria”. Queste specie, grazie alle loro resistenza e alla loro grande tolleranza generale agli stress, nascono e si sviluppano in substrati privi di copertura vegetale, come il materiale detritico depositatosi in seguito alla colata oggetto di studio.

La presenza dell'Abete rosso invece può essere riconducibile alla grande diffusione di individui nelle adiacenze e alla propria capacità di sviluppare un apparato radicale superficiale ed esteso orizzontalmente piuttosto che in profondità, reperendo le sostanze organiche per l'accrescimento anche in substrati carenti come i depositi detritici.

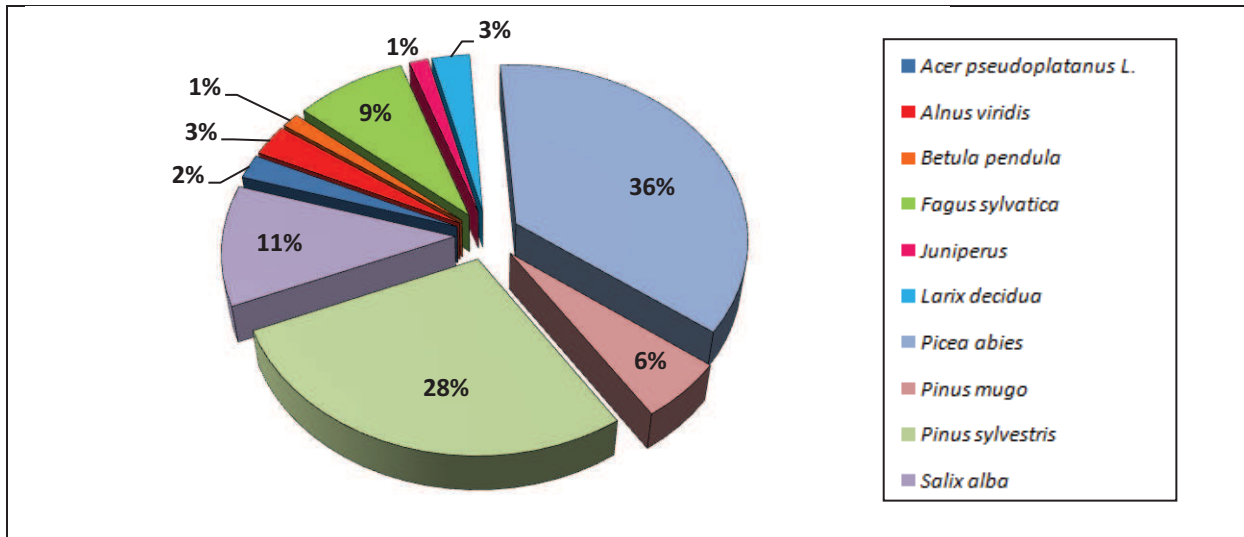


Figura 61 - Frequenze relative all'area disturbata.

Analizzando i danni presenti, su quasi la totalità degli individui sono state rilevate abrasioni e scorticamenti causati dall'impatto e scorrimento dei detriti inglobati nella colata, durante il regolare transito e deposito verso valle; visivamente, si notano maggiori spessori di deposito a monte dei singoli individui (arborei ed arbustivi) che hanno agito da “filtro”, riducendone il volume della massa detritica fluitante a valle (Figura 62). Tali osservazioni,

prettamente visive verranno poi confermate nel paragrafo successivo riguardante l'analisi quantitativa dei dati rilevati.



Figura 62 - Abrasioni e maggiori depositi rilevati negli individui campionati.

Per quanto concerne l'analisi della severità sulla vegetazione presente nell'area "danneggiata", o coinvolta dal passaggio e deposito del *debris flow*, si riportano i risultati relativi a:

- relazione tra il diametro individuo e spessore del deposito a monte;
- percentuale di individui morti in relazione al diametro;
- percentuale di individui morti in relazione sia al diametro che allo spessore del deposito a monte.

Questi, vengono divisi tra "componente arborea" ed "arbustiva", in quanto le loro caratteristiche vegetative e geometriche fortemente differenti (affermazione, densità, altezze e resistenze meccaniche), si traducono in comportamenti e suscettibilità differenti nei confronti dell'impatto e dei danni provocati dalla colata.

4.3.2.1 Severità del fenomeno sulla componente ARBOREA

Vengono riportati in seguito i risultati relativi all'analisi della severità del fenomeno sulla "componente arborea" ovvero quella parte di *soprasuolo caratterizzata dalla presenza di individui di altezza superiore a 5 m che esercitano una copertura sul suolo superiore al 30% ed estensione superiore ai 2'000 m²* (Legge forestale regionale n. 52/78).

Severità sulla componente ARBOREA								
Classi di diametro (m)	Spessore medio deposito a monte (m)	VIVI nella classe diam.		MORTI nella classe diam.		Specie dominanti (maggiori 3 percentili)		
		n.	%	n.	%	Alta	Media	Bassa
< 0.05	0.35	263	30.76	31	52.54	P.s.	P.a.	F.s.
0.05 - 0.10	0.45	245	28.65	19	32.20	P.a.	P.s.	F.s.
0.1 - 0.15	0.44	94	10.99	-	-	P.a.	P.s.	S.a.
0.15 - 0.20	0.38	41	4.80	4	6.78	P.a.	S.a.	P.s.
0.20 - 0.25	0.37	54	6.32	-	-	P.a.	S.a.	P.s.
0.25 - 0.30	0.46	28	3.27	-	-	P.a.	P.s.	S.a.
0.30 - 0.35	0.42	57	6.67	1	1.69	P.a.	S.a.	P.m.
0.35 - 0.40	0.52	31	3.63	2	3.39	P.a.	L.d.	S.a.
0.40 - 0.45	0.50	27	3.16	1	1.69	P.a.	S.a.	P.m.
0.45 - 0.50	0.57	10	1.17	1	1.69	S.a.	P.a.	P.m.
0.50 - 0.60	0.60	4	0.47	-	-	L.d.	P.a.	-
> 0.60	1.00	1	0.12	-	-	P.a.	-	-
	0.51	855	100.00	59	100.00			

F.s. : *Fagus sylvatica* - L.d : *Larix decidua* - P.a. : *Picea abies*
P.m. : *Pinus mugo* - P.s. : *Pinus sylvestris* - S.a. : *Salix alba*

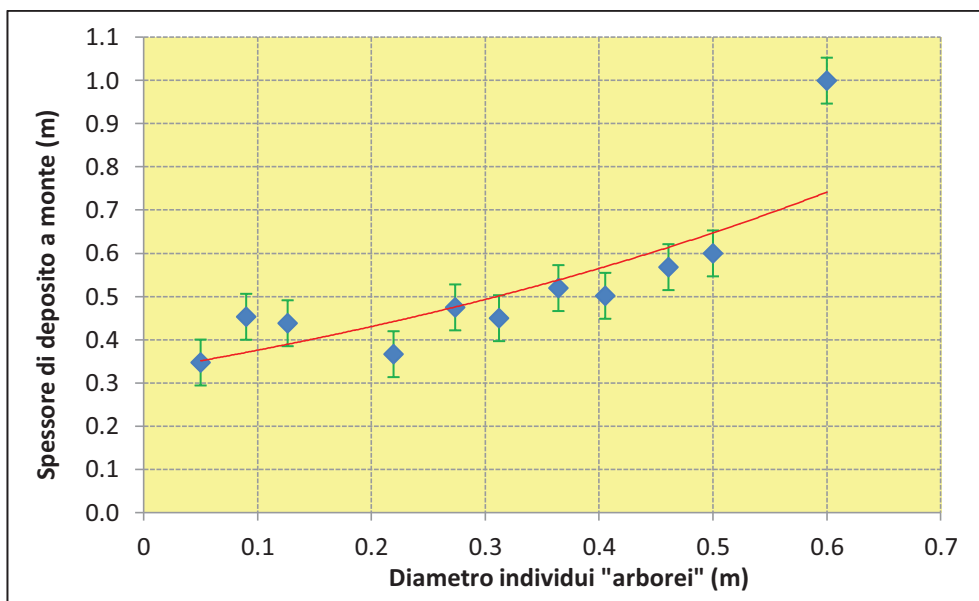


Figura 63 - Relazione diametro - spessore del deposito relativi alla componente arborea.

Considerando il grafico in Figura 63 è evidente una relazione direttamente proporzionale di tipo esponenziale tra il diametro degli individui arborei e lo spessore deposito trattenuto a monte e conferma quanto stabilito da Ishikawa *et al.* (2003) ovvero che maggiori sono le dimensioni degli individui forestali, maggiore risulterà l'efficacia di trattenuta nei confronti dei sedimenti trasportati nei debris flow.

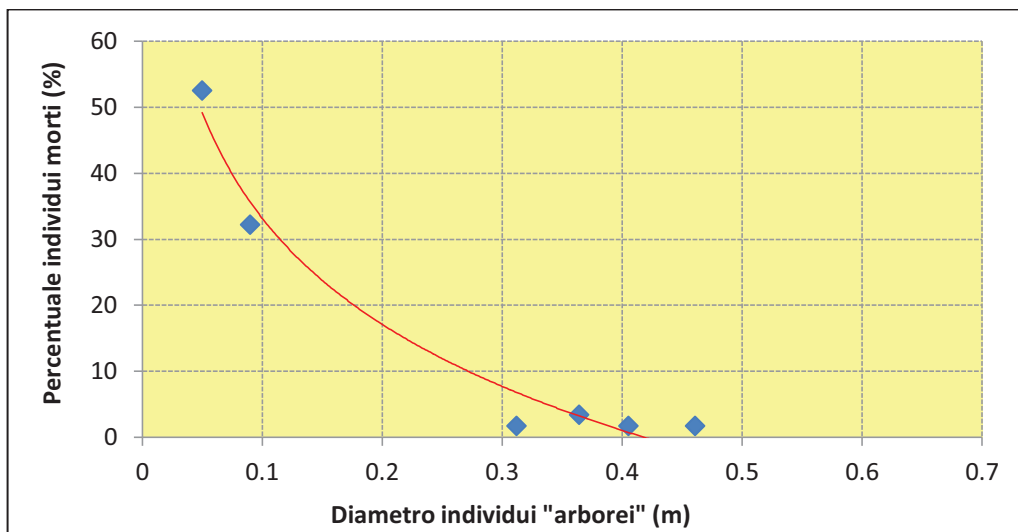


Figura 64 - Relazione diametro - percentuale morti relativi alla componente arborea.

Ishikawa *et al.* (2003) e Mizuyama *et al.* (1988) affermano che alberi con diametri maggiori hanno una minore probabilità di essere danneggiati seriamente dai detriti (anche se il flusso ne trasporta di grandi dimensioni), perché il momento resistente orizzontale è proporzionale al quadrato o cubo del diametro dell'albero. Questo trova reale applicazione e conferma nel grafico in Figura 64 dove è evidente una mortalità fortemente decrescente all'aumentare del diametro degli individui rilevati.

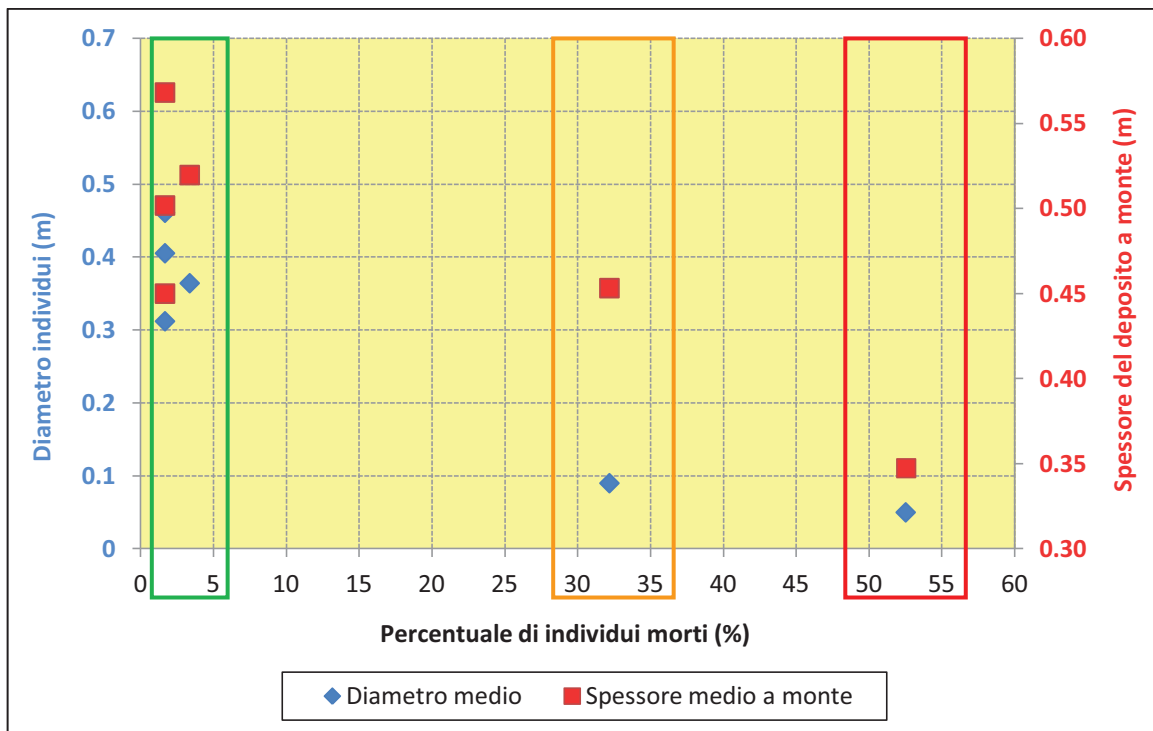


Figura 65 - Relazione diametro – percentuale morti – spessore del deposito (i punti rappresentano la media in base al “range” di mortalità).

In Figura 65 sono stati combinati i risultati allo scopo di mettere in relazione, attraverso un unico grafico le relazioni “percentuale morti-spessore deposito-diametro individui”; sono emerse dunque tre classi di mortalità ovvero:

- Mortalità bassa: caratterizzata da individui con diametri relativamente alti (maggiori di 0.30 m) e spessori medio-alti (tra 0.40 e 0.55 m);
- Mortalità media: caratterizzata da individui con spessori analoghi alla classe di mortalità “bassa” ma più sensibili al fenomeno causa i loro diametri (di circa 0.09 m) nettamente inferiori alla classe di mortalità precedente;
- Mortalità alta: caratterizzata da individui che, causa i loro diametri esigui (circa 0.05 m) subiscono l’evento come un “agente letale” anche se lo spessore del deposito associato risulta molto basso.

Dal punto di vista visivo si nota inoltre un generale stato deperente degli individui del popolamento, causato dalla presenza del materiale detritico (povero dal punto di vista organico-minerale) depositatosi al di sopra del naturale substrato pre-esistente l’evento. Questo impedisce sia alle sostanze organiche di raggiungere il suolo naturale ed essere poi assorbite dagli apparati radicali che alla radiazione solare di raggiungere il substrato fertile per stimolare la futura rinnovazione.

4.3.2.2 Severità del fenomeno sulla componente ARBUSTIVA

A completamento del capitolo precedente si riportano i risultati relativi all'analisi della severità del fenomeno sulla "componente arbustiva" ovvero *le formazioni vegetali naturali, raramente d'impianto antropico, a prevalenza di specie tendenzialmente policormiche decidue, semidecidue o sempreverdi aventi un'altezza media inferiore a 5 m* (Legge forestale regionale n. 52/78).

Severità sulla componente ARBUSTIVA								
Classi di diametro (m)	Spessore deposito a monte (m)	VIVI nella classe diam.		MORTI nella classe diam.		Specie dominanti (maggiori 3 percentili)		
		n.	%	n.	%	Alta	Media	Bassa
< 0.60	0.28	9	16.36	5	41.67	S.a.	P.m.	-
0.60 - 0.70	0.32	6	10.91	3	25.00	S.a.	P.m.	-
0.70 - 1.00	0.33	9	16.36	-		S.a.	P.m.	J.c
1.00 - 1.20	0.36	6	10.91	2	16.67	S.a.	P.m.	-
1.20 - 1.40	0.55	3	5.45	1	8.33	P.m.	P.m.	-
1.40 - 1.50	0.60	5	9.09	-		P.m.	P.m.	-
1.50 - 1.60	0.65	5	9.09	-		P.m.	J.c	S.a
1.60 - 1.70	0.60	3	5.45	-		P.m.	J.c	S.a.
1.70 - 2.00	0.58	6	10.91	-		P.m.	J.c	-
> 2.00	1.10	3	5.45	1	8.33	P.m.	J.c	-
	0.54	55	100.00	12	100.00			

J.c. : *Juniperus communis*

-

P.m. : *Pinus mugo*

-

S.a. : *Salix alba*

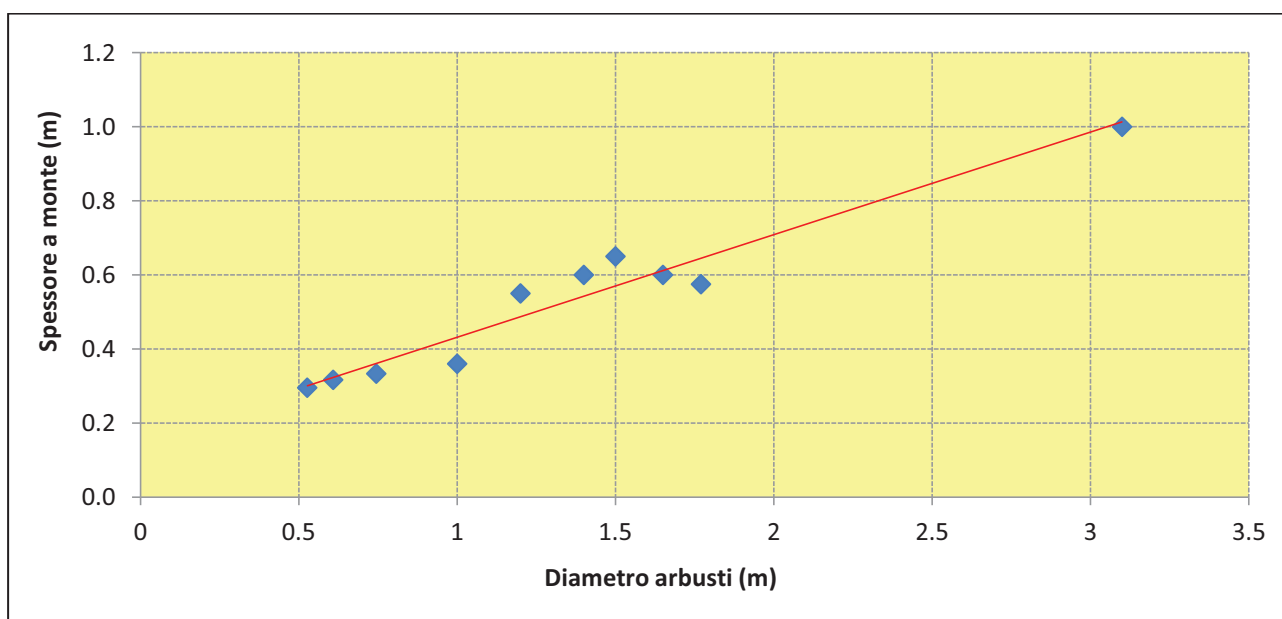


Figura 66 - Relazione diametro - spessore del deposito relativi alla componente arbustiva.

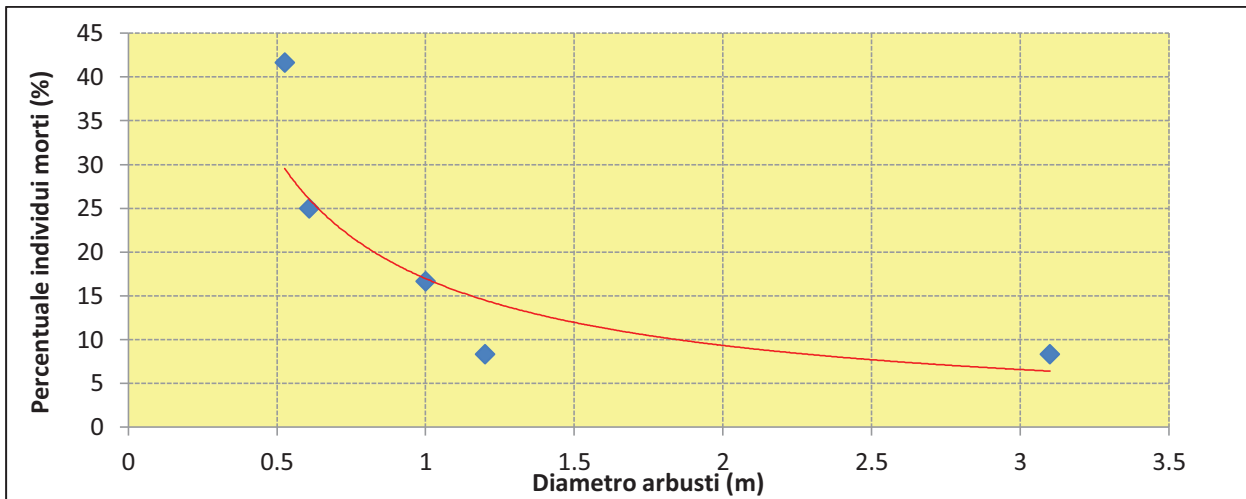


Figura 67 - Relazione diametro – percentuale morti relativi alla componente arbustiva.

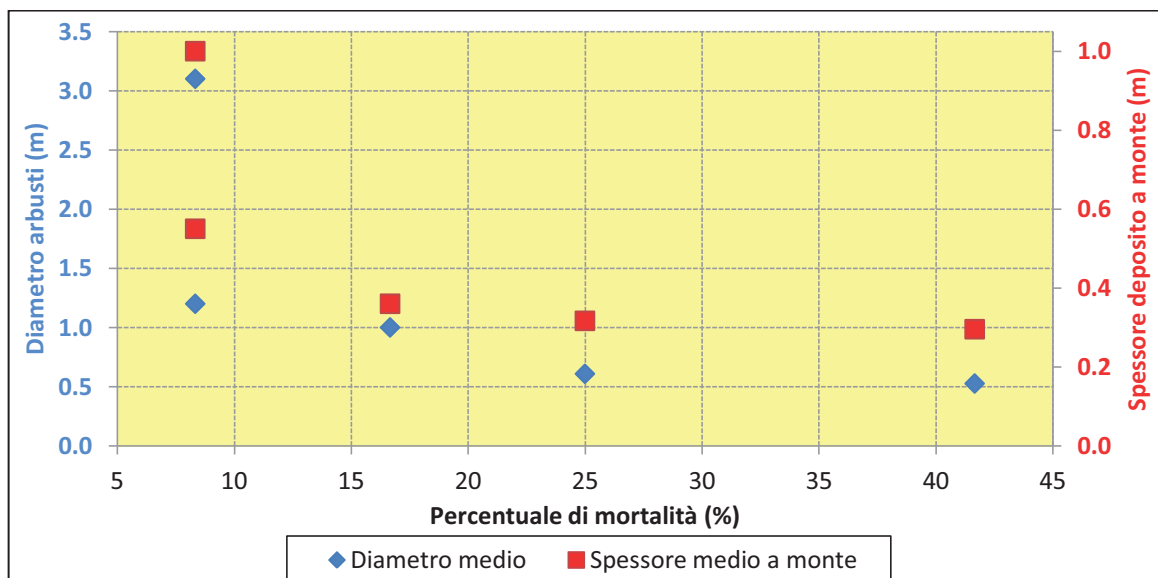


Figura 68 - Relazione diametro – percentuale morti – spessore del deposito.

Dai grafici è emerso un comportamento della componente arbustiva quasi analogo a quanto rilevato per la componente arborea soprattutto per quanto riguarda la relazione tra il diametro dell'arbusto e l'entità dello spessore trattenuto a monte dove è evidente una maggiore trattenuta rispetto agli individui arborei.

Una differenza sostanziale si può osservare analizzando la mortalità degli individui sul totale in quanto, si registrano valori nettamente più alti rispetto alla situazione precedente dovuti, oltre al maggior spessore di sedimento trattenuto, soprattutto a causa del tipico portamento arbustivo delle specie. Questo si traduce in una maggiore suscettibilità al fenomeno di tali specie che essendo caratterizzate da "altezze limitate", subiscono gravi danni che ne pregiudicano la sopravvivenza, stroncandosi, ribaltandosi e venendo totalmente interrate e sepolte dai detriti.

4.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON I MODELLI FLO-2D E RIVERFLO-2D

Vengono riportate le simulazioni eseguite con i modelli numerici FLO-2D e RIVERFLO-2D allo scopo di simulare l'evento di colata detritica depositatosi nell'area conoidale del bacino in studio e verificare se i modelli impiegati, rilevando la presenza della vegetazione in conoide, riescano a simulare l'effetto benefico della stessa nei confronti della colata detritica, riducendone soprattutto la distanza di arresto (*runout*) e limitandone l'espansione laterale (*spreading*). Sono stati poi confrontati i risultati ottenuti dai modelli per poter valutare quale dei due abbia simulato con maggiore accuratezza la colata considerando l'effetto della vegetazione rilevata.

4.4.1 SIMULAZIONE EFFETTUATE CON IL MODELLO FLO-2D

La simulazione dell'evento di colata del 30 luglio 2012, nel modello FLO-2D, è avvenuta assumendo come dominio di calcolo l'intero conoide del bacino.

I parametri in input sono stati i seguenti.

Assegnazione di due celle di "inflow" poste poco a monte dell'apice del conoide, a una quota di circa 1175 m s.l.m.. A queste è stato assegnato un idrogramma liquido ed una concentrazione volumetrica solida di 0.585 costante per tutta la durata dell'idrogramma. Il ricorso ad una concentrazione costante, invece che variabile, e più realistica per la modellazione del fenomeno in oggetto, è da ricondurre alla necessità di un confronto con il programma RIVERFLO-2D. L'assegnazione dei parametri reologici (sforzo tangenziale e viscosità) è avvenuta in seguito alla calibrazione che ha portato alla scelta dei valori proposti in Tabella 13, dall'equazione "Glenwood 1" con il coefficiente di resistenza K pari a 2000 ed imponendo un valore di *surface detection* pari a 0.20 m.. Questo al fine di mantenere spessori di deposito consoni con quanto rilevato in campo. ***Le prove di calibrazione hanno condotto inoltre alla scelta di arrestare la simulazione a 80 minuti in modo tale da non avere volume in uscita e mantenere alti spessori di deposito nel dominio di calcolo.***

Sono state eseguite tre simulazioni.

1. Simulazione "priva" degli individui forestali per individuare il naturale deposito della colata incondizionato dalla presenza vegetale;
2. Inserendo singolarmente (uno ad uno) gli individui forestali rilevati con il relativo diametro, o area di "disturbo" per quanto concerne la componente arbustiva;

3. individuando aree omogenee in funzione sia della vicinanza reciproca tra di essi che della densità vegetale presente (arborea ed arbustiva).

La presenza della vegetazione è avvenuta in FLO-2D attraverso l'aumento del coefficiente di scabrezza n di Manning da $0.125 \text{ s/m}^{1/3}$ (ottenuta in funzione dell'uso del suolo) a $0.15 \text{ s/m}^{1/3}$.

Come si può vedere in Figura 69, relativa alla simulazione priva di individui vegetali, (arborei ed arbustivi) si rilevano spessori di deposito molto elevati, con altezze che raggiungono valori massimi di circa 2.50 m e con uno spessore medio del deposito pari a circa 0.95 m. Tale simulazione, non essendo influenzata dalla presenza della vegetazione che, come già descritto nel capitolo introduttivo svolge un'importante funzione nel limitare l'espansione e la distanza di arresto del fenomeno, ha generato un deposito molto esteso, soprattutto nelle aree a valle della strada forestale che conduce alla località "Pralongo", con una superficie depositata pari a $83'252 \text{ m}^2$ (nettamente superiori rispetto a quanto rilevato in campo) ed una distanza di arresto di circa 590 m. Inoltre, sempre a causa dell'assenza della componente arborea ed arbustiva nella simulazione, il modello ha determinato velocità molto elevate, che raggiungono valori superiori ai 10 m/s nella parte più alta del deposito.

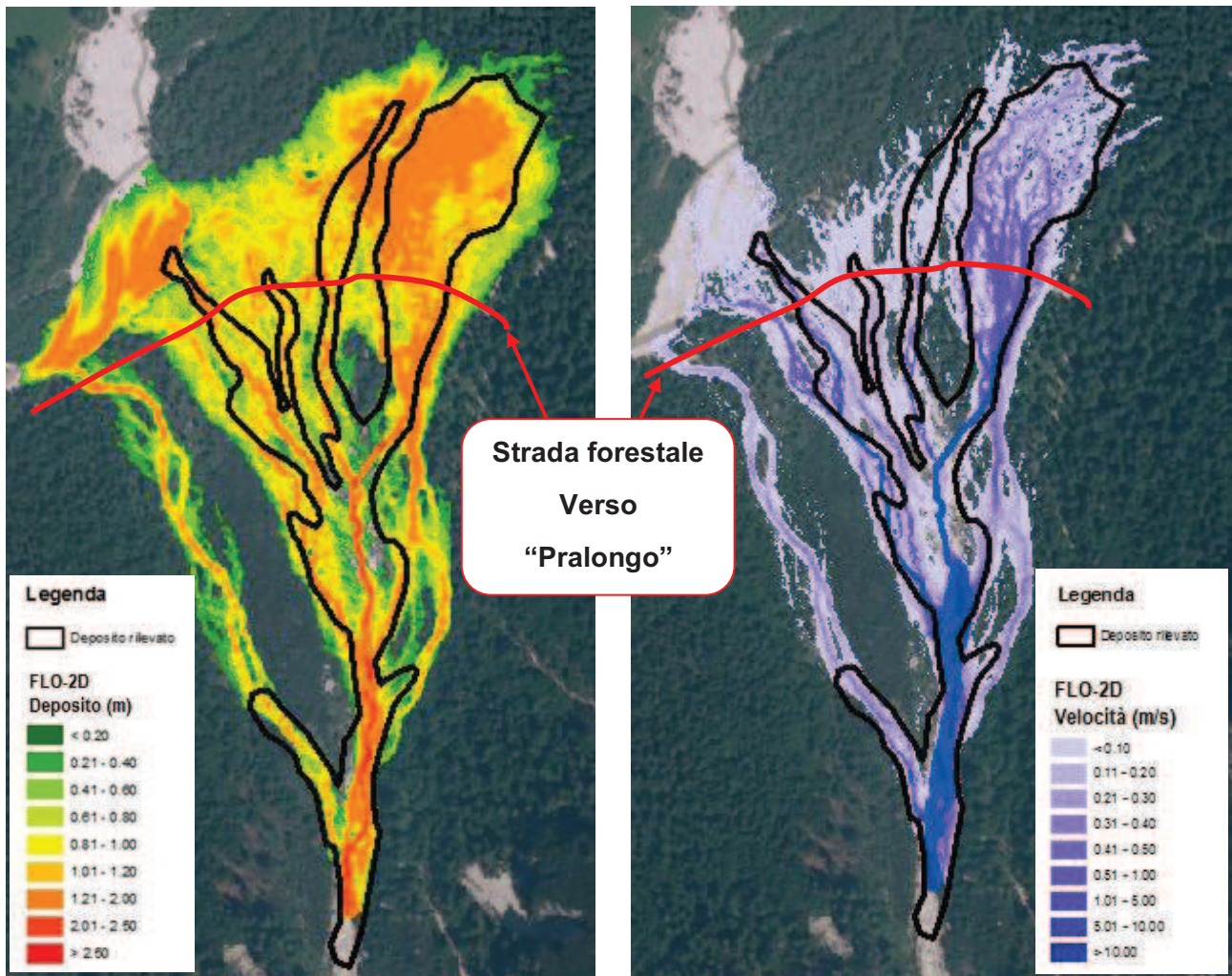


Figura 69 - Altezze di deposito senza vegetazione con il modello FLO-2D.

Figura 70 - Velocità massima della colata senza vegetazione con il modello FLO-2D.

Le simulazioni condotte aumentando la scabrezza nel dominio di calcolo dove presente la vegetazione non ha fatto emergere grandi differenze tra la situazione “individui singoli” e “gruppi omogenei”. Come si può notare in Figura 71 e Figura 72 per entrambe le tipologie simulate, il modello FLO-2D ha risentito molto efficacemente della presenza vegetale all’interno del dominio di calcolo, nonché dell’area conoidale del bacino. Grazie all’effetto della vegetazione presente, si nota una drastica riduzione sia della superficie coinvolta, pari a 31’490 m² (quasi identica a quanto rilevato in campo), sia della distanza di arresto, pari a 492 m ed infine, analizzando gli spessori si rilevano valori massimi di circa 1.50 m, verosimili con quanto rilevato in campo durante le operazioni di rilievo.

Tali risultati sono stati ottenuti, escludendo dalla simulazione, i valori di spessore inferiori a 0.15 m e trascurati durante i rilievi in campo causa la difficoltà di rilevare la misura oggettiva riferita all’evento senza considerare successivi episodi di dilavamento.

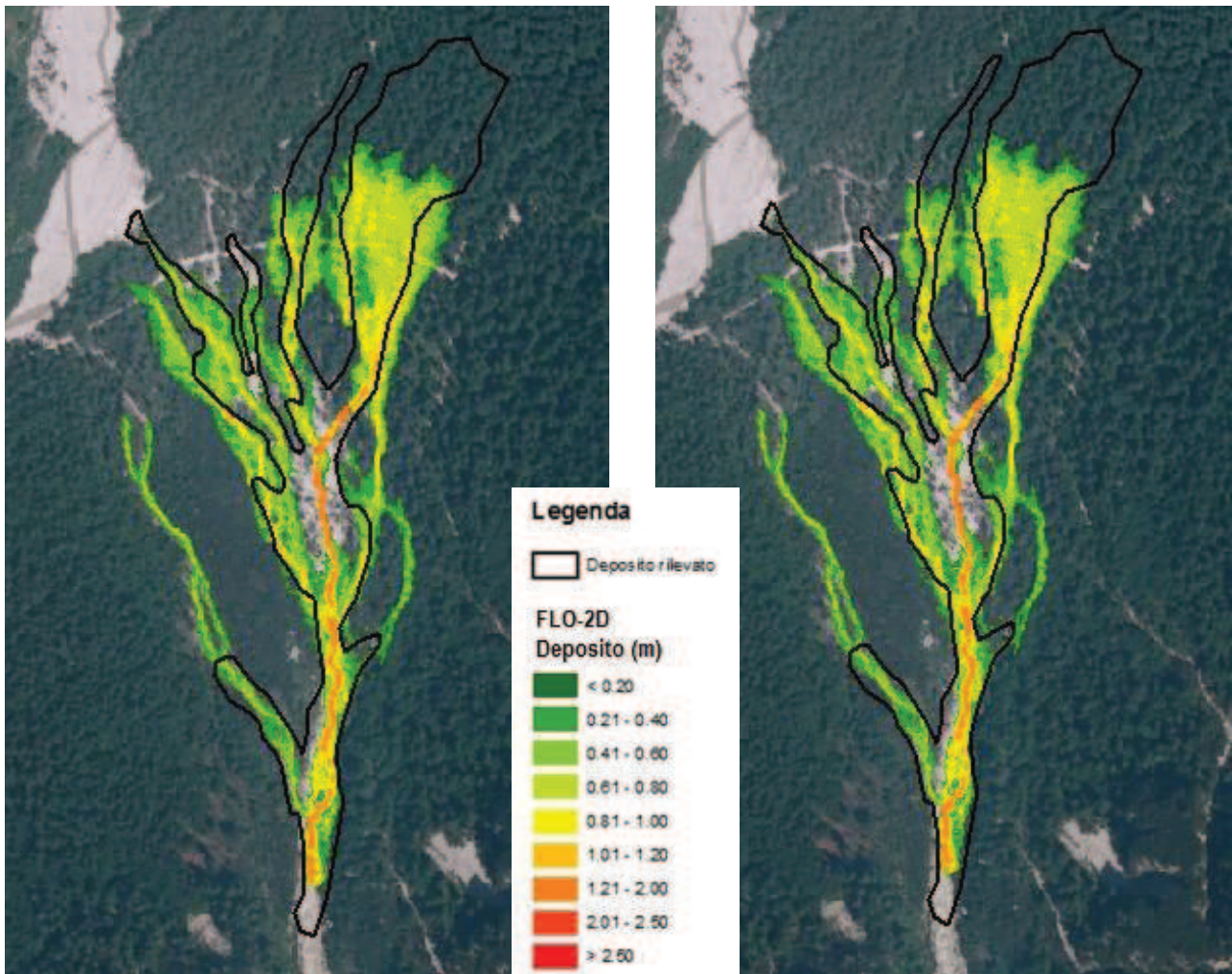


Figura 71 - Altezze di deposito CON vegetazione "singola" con il modello FLO-2D.

Figura 72 - Velocità massima della colata CON vegetazione "a gruppi" con il modello FLO-2D.

Dai risultati delle simulazioni infine è evidente, sia nella situazione ad "individui singoli" (Figura 73) che nella situazione a "gruppi omogenei" (Figura 74), una velocità nettamente inferiore rispetto alla situazione precedente (assenza di vegetazione) con valori massimi prossimi ai 3.50 m/s.

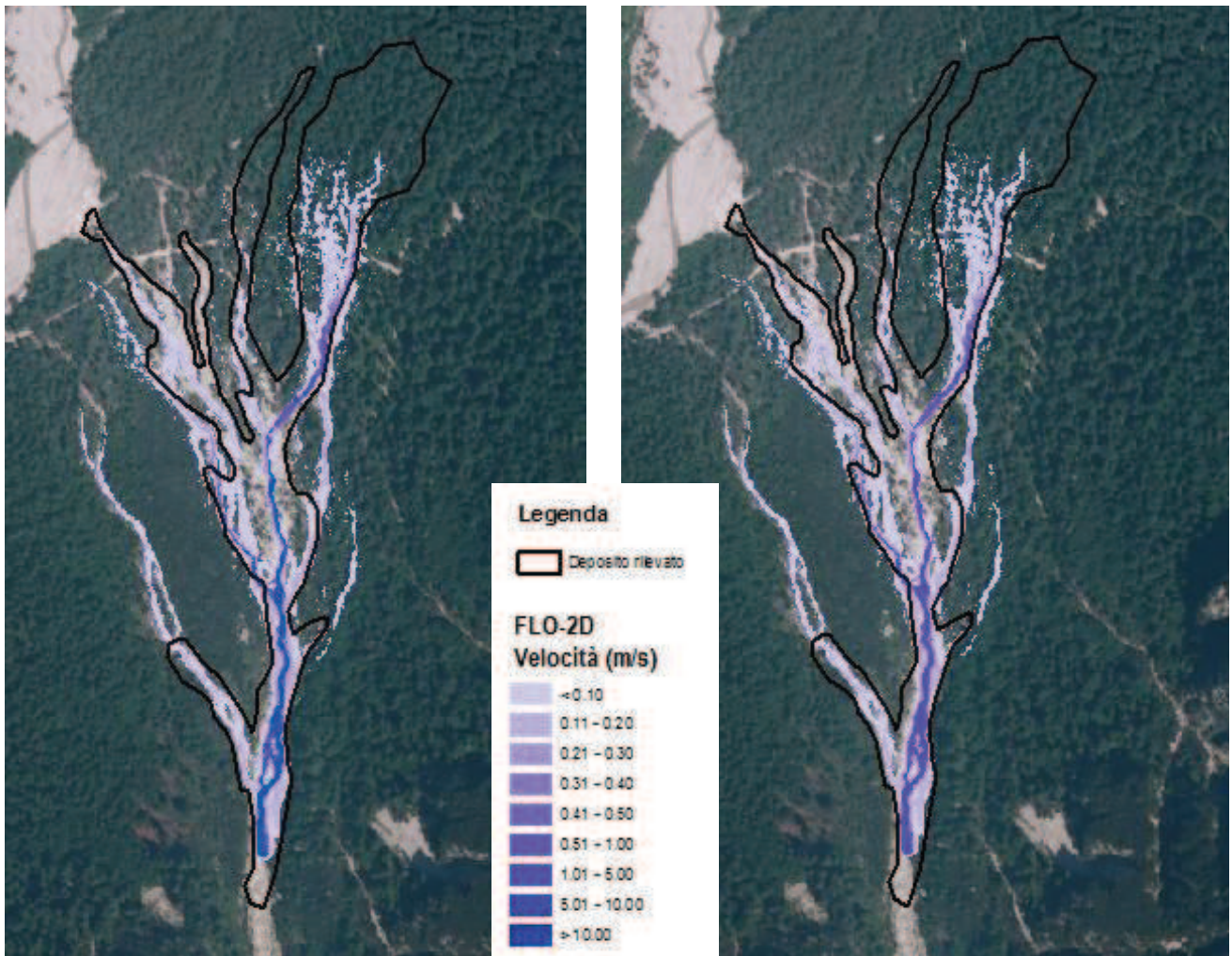


Figura 73 - Altezze di deposito CON vegetazione "singola" con il modello FLO-2D.

Figura 74 - Velocità massima della colata CON vegetazione "a gruppi" con il modello FLO-2D.

Osservando i volumi depositati, la modellazione eseguita considerando la componente vegetale ha senza dubbio fornito risultati molto accurati e quasi analoghi a quanto riscontrato in campo.

4.4.2 SIMULAZIONE EFFETTUATE CON IL MODELLO RIVERFLO-2D

Successivamente alla modellazione con FLO-2D è stata eseguita la modellazione della medesima colata con il modello RIVERFLO-2D. Anche in questo caso, l'inflow del modello è stato collocato all'apice del conoide assegnando un *idrogramma totale del debris flow* (solido più liquido, linea rossa in Figura 48) calcolato ipotizzando una concentrazione costante del flusso per poter poi confrontare i risultati con le simulazioni condotte con il modello precedente. Per la modellazione del fenomeno di debris flow si è scelto di impiegare, tra gli algoritmi proposti, il modello "*Simplified Bingham*". La scelta dei parametri reologici, in questo caso sforzo tangenziale e viscosità, è stata semplificata calcolando i valori risultanti dalle equazioni (43) e (44) di FLO-2D, e valori dei parametri α e β suggeriti dalla "*Glenwood1*" con una concentrazione solida di 0.585. I valori sono risultati pari rispettivamente a 441 N/m^2 e 1973 P (Poises) è stata infine assegnata una densità globale del flusso pari a 2000 kg/m^3 . La durata della simulazione è stata pari a 80 minuti per consentire un confronto con il modello FLO-2D. Anche con il modello RIVERFLO-2D sono state eseguite le tre simulazioni analogamente a quanto condotto con FLO-2D ovvero NON considerando la componente vegetale, inserendo singolarmente uno ad uno gli individui forestali rilevati ed infine riunendo gli individui rilevati in gruppi.

Come si può notare in Figura 75 il modello, simulando l'evento di colata e trascurando l'influenza della componente vegetale in conoide, ha generato un deposito relativamente esteso soprattutto nelle aree terminali del conoide, prossime alla confluenza con il torrente Ansiei. Tale deposito si estende su una superficie di circa $71'200 \text{ m}^2$, che può essere valutata pari al doppio rispetto all'estensione realmente rilevata in campo e la conseguente distanza di arresto è stata calcolata pari a 650 m.

Relativamente al volume depositato e agli spessori simulati, il modello ha generato un volume finale in conoide di circa $20'000 \text{ m}^3$ e spessori sostanzialmente bassi, con valori massimi di 1.00 m e medi compresi tra 0.25 e 0.30 m.

Valutando infine le velocità assunte dalla colata, durante il suo scorrimento e deposito verso valle (Figura 76), il modello ha simulato valori massimi di 1.50 m/s , concentrati soprattutto nella zona superiore del deposito e all'interno del collettore principale, che si riducono drasticamente proseguendo verso valle a causa soprattutto di una sensibile riduzione della pendenza locale nelle aree terminali del conoide.

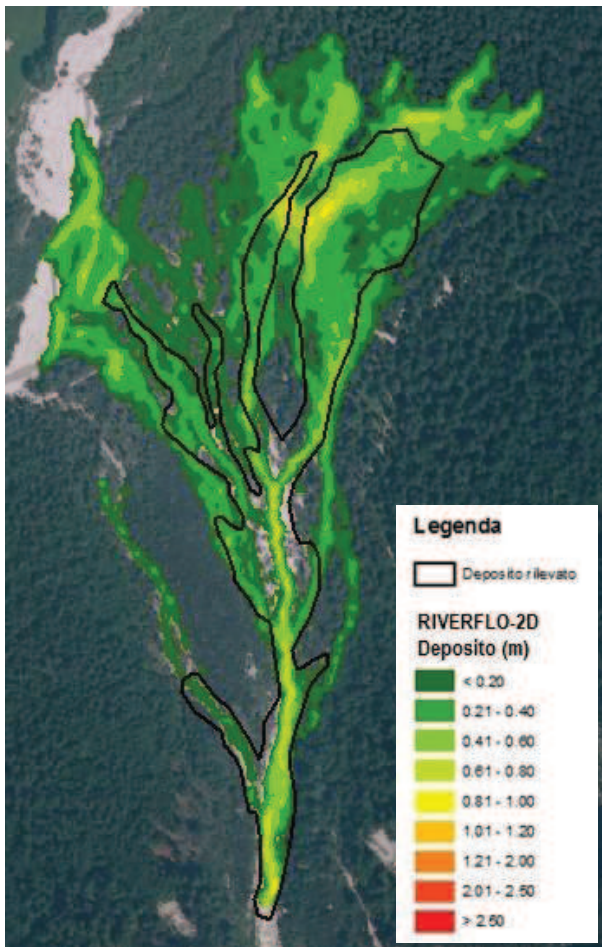


Figura 75 - Altezze di deposito senza vegetazione con il modello RIVERFLO-2D.

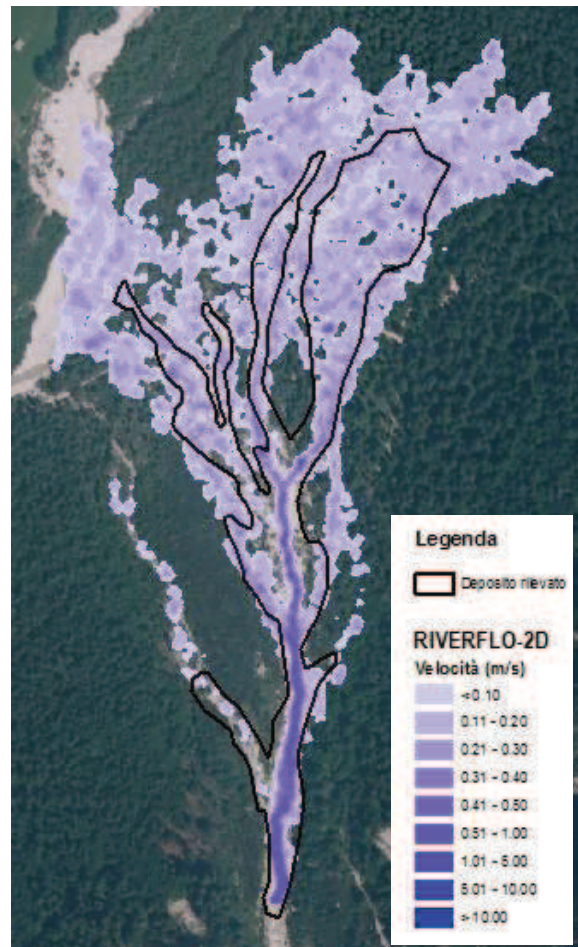


Figura 76 - Velocità massima della colata senza vegetazione con il modello RIVERFLO-2D.

Per quanto riguarda le simulazioni condotte inserendo la componente vegetale, sono stati eseguiti i medesimi step procedurali e le stesse operazioni già descritte in precedenza relative all'impiego del modello FLO-2D.

Dai risultati emersi dalle simulazioni, come si può notare in Figura 77 e Figura 78 il modello con RIVERFLO-2 ha risentito anch'esso (come quanto già avvenuto con il FLO-2D) molto efficacemente della presenza vegetale all'interno della piana conoidale del bacino, senza rilevare grandi differenze tra la situazione "individui singoli" e "gruppi".

E' evidente una leggera riduzione sia della superficie coinvolta, pari a $59'125 \text{ m}^2$, sia della distanza di arresto, pari a 580 m ed infine, analizzando gli spessori si rilevano valori massimi di circa 1.00 m, leggermente inferiori rispetto alla situazione rilevata in campo.

Le velocità simulate dal modello presentano valori massimi compresi tra 0.70 e 0.80 m/s (Figura 79 e Figura 80), ed essendo molto inferiori alla situazione priva di vegetazione mostrano sia graficamente che quantitativamente l'effetto benefico della vegetazione nel ridurre in qualche modo l'energia impattante della colata.

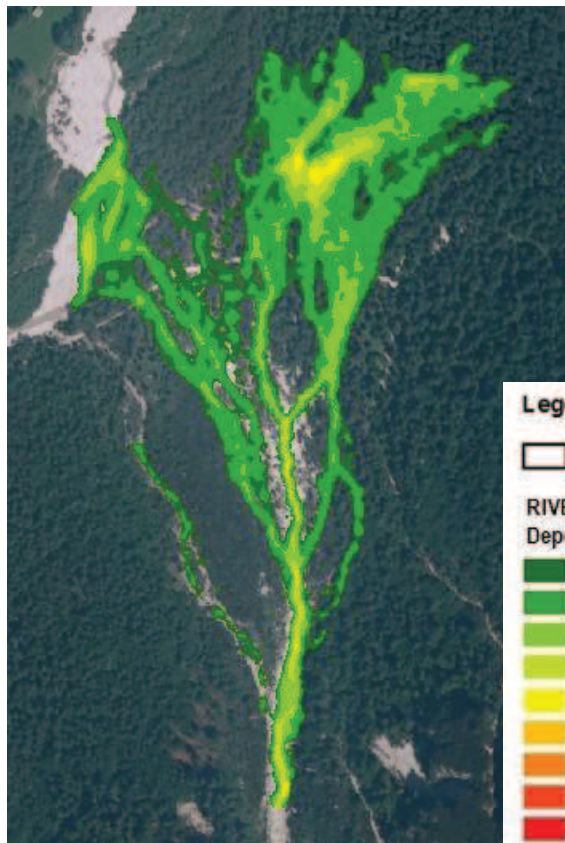


Figura 77 - Altezze di deposito CON vegetazione "singola" con il modello RIVERFLO-2D.

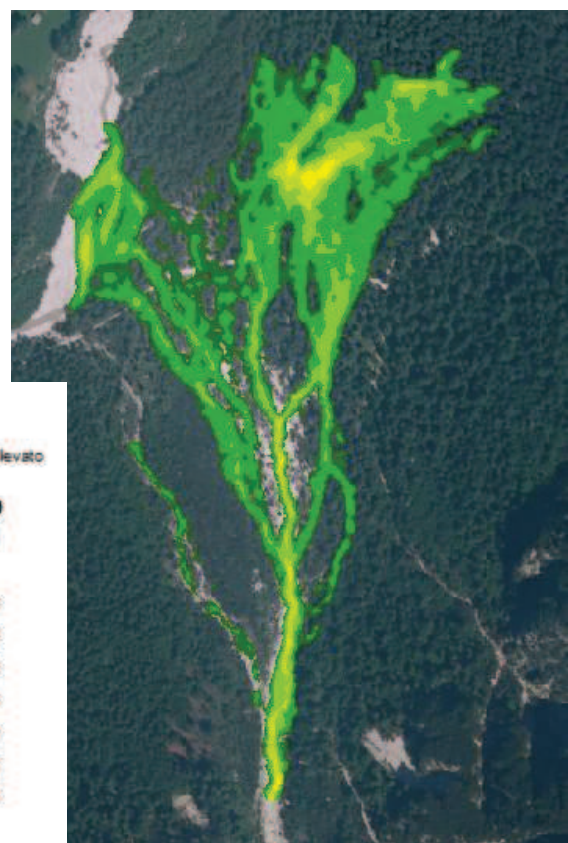


Figura 78 - Velocità massima della colata CON vegetazione "a gruppi" con il modello RIVERFLO-2D.

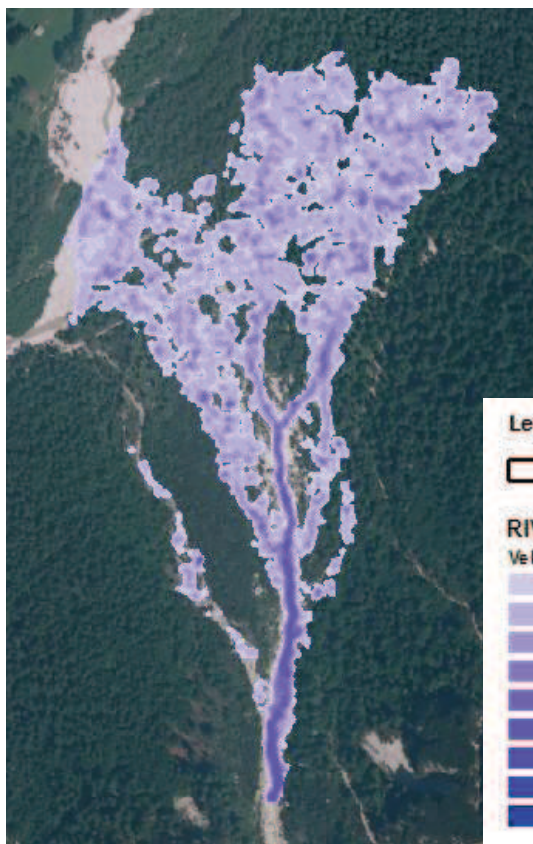


Figura 79 - Altezze di deposito CON vegetazione "singola" con il modello RIVERFLO-2D.

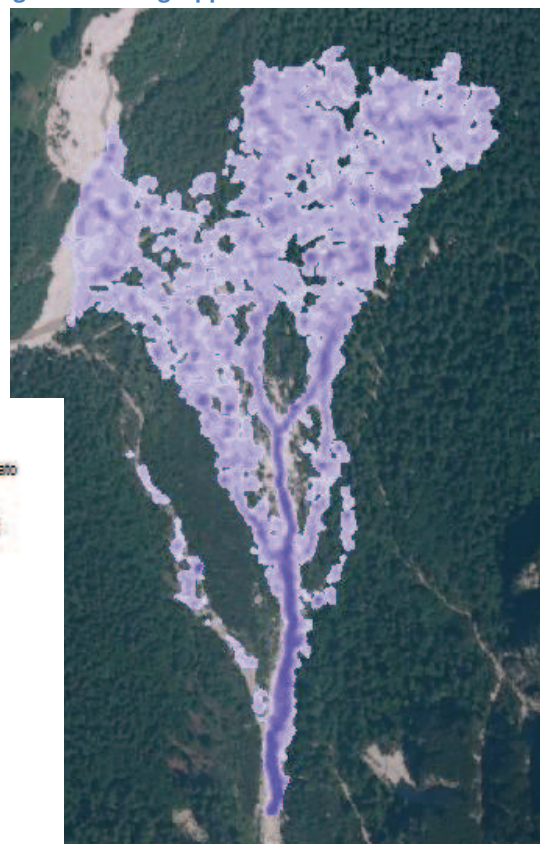


Figura 80 - Velocità massima della colata CON vegetazione "a gruppi" con il modello RIVERFLO-2D.

4.4.3 VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI

Di seguito vengono riportati i valori di accuratezza (in termini di estensione areale) riguardanti le simulazioni effettuate con i modelli FLO-2D e RIVERFLO-2D, confrontate con il reale deposito rilevato in campo e considerando la presenza della componente vegetale sia a singoli individui che a gruppi.

Per quanto riguarda le simulazioni effettuate, come si può vedere in Tabella 27, è evidente l'incremento di accuratezza (di circa 10 punti percentuali) ottenuto in seguito all'inserimento la componente vegetale; nello specifico, il software FLO-2D fornisce un risultato leggermente migliore rispetto al modello RIVERFLO-2D con un'accuratezza complessiva, riferita alla superficie di deposito simulata, (δ) del 69%, rispetto a quella ottenuta con il modello RIVERFLO-2D valutata pari al 67%.

Tabella 27 - Valori di accuratezza delle simulazioni effettuate con i modelli FLO-2D e RIVERFLO-2D.

Accuratezza	FLO-2D			RIVERFLO-2D		
	SENZA vegetazione	Individui singoli	A gruppi	SENZA vegetazione	Individui singoli	A gruppi
α	0.9311	0.5575	0.5579	0.8409	0.7842	0.7893
β	0.069	0.4425	0.4421	0.1591	0.2158	0.2107
γ	1.5068	0.3647	0.3643	1.3456	0.9472	0.9629
$\beta+\gamma$	1.5757	0.8072	0.8065	1.5048	1.1629	1.1736
δ	59.06%	69.00%	69.10%	55.88%	67.40%	67.25%

Tale accuratezza, non deve essere considerata come un vero e proprio "indice di correttezza" univoco per valutare la bontà delle simulazione condotte in quanto considera solo un unico parametro ovvero, la superficie planimetrica di materiale depositatosi in seguito all'evento. Per una corretta lettura della bontà delle simulazioni, sia in termini quantitativi che qualitativi, sarebbe corretto analizzare anche ulteriori parametri emersi come ad esempio, volume totale, spessori minimi, medi e massimi e velocità del flusso durante tutta la durata dell'evento.

5 DICUSSIONE DEI RISULTATI EMERSI CON I MODELLI FLO-2D E RIVERFLO-2D

Dopo aver elencato i risultati emersi dalle simulazioni eseguite con entrambi i modelli utilizzati (FLO-2D e RIVERFLO-2D) è opportuno eseguire un confronto, sia quantitativo che qualitativo allo scopo di scegliere il modello che ha rappresentato il *debris flow* analizzato con una maggiore accuratezza globale, non solo espressa in termini di congruenza areale.

Innanzitutto è evidente, in seguito all'inserimento della componente vegetale rilevata in campo, la corretta risposta dei modelli, nella simulazione della colata detritica oggetto di studio, soprattutto per quanto riguarda i parametri geo-morfologici del materiale detritico depositatosi in conoide. Tale risposta conferma quanto rilevato in letteratura ovvero il ruolo efficace della vegetazione nell'alterare sia le caratteristiche reologiche (trattenuta di materiale detritico, riduzione della velocità, alterazione della concentrazione solida), che geometriche della colata, riducendo la *runout* e l'area di espansione (*Ishikawa, 2000; May, 2002; Sakalsetal et al, 2006*).

In particolare, il modello che maggiormente ha risentito dell'inserimento della componente vegetale è risultato FLO-2D, il quale ha registrato significative differenze, soprattutto relative al volume e alla superficie inondata, tra la situazione "senza vegetazione" e quella "con vegetazione" (riduzione del 70 % circa), mentre con RIVERFLO-2D, tali differenze sono emerse con entità e percentuale nettamente inferiori.

Analizzando i volumi generati dalle simulazioni, evidenti in Tabella 28, i risultati migliori sono emersi con il modello FLO-2D ottenendo, nella situazione "vegetata" valori, relativi sia al volume che all'area di deposito, molto simili con quanto rilevato in campo.

Il modello più attendibile, per la simulazione della colata detritica oggetto di studio, dunque è risultato il software FLO-2D con i parametri reologici definiti dall'equazione Glenwood1 in quanto, grazie ad una maggiore precisione nella definizione di quest'ultimi, ha fornito risultati coerenti e molto simili (quasi identici) con quanto rilevato nella realtà rispetto ai risultati ottenuto con il modello RIVERFLO-2D.

Tabella 28 - Confronto dei risultati emersi dai modelli FLO-2D e RIVERFLO-2D.

	Reale	FLO-2D			RIVERFLO-2D		
		NO vegetaz.	SI Vegetaz.	Δ	NO vegetaz.	SI Vegetaz.	Δ
Volume (m ³)	14535	77050	17880	59170 (-77 %)	71200	17704	12075 (-17 %)
Area (m ²)	34129	83252	31490	51762 (-62 %)	20000	59125	2296 (-12 %)
Run-out (m)	570	590	490	100 (-17 %)	650	580	70 (-11 %)

6 CONCLUSIONI

Le colate detritiche sono fenomeni di trasporto solido ad elevata concentrazione di sedimenti, materiale vegetale, acqua ed aria, dotati di un notevole potere distruttivo i quali si sviluppano come un'ondata di piena, che si propaga verso valle con velocità che possono raggiungere anche qualche decina di metri al secondo e si arrestano nel conoide. Tali conoidi sono caratterizzati dai maggiori livelli di pericolosità derivata soprattutto da una maggiore densità di strutture antropiche. A difesa di queste, gli ecosistemi forestali possono svolgere un ruolo importante nel prevenire e mitigare i pericoli naturali e quindi, nella salvaguardia degli insediamenti umani, nella difesa del territorio agro-silvo-pastorale e più in generale nella conservazione dell'ambiente (Ishikawa et al. 2003; May et al. 2002). Con la presente tesi sono stati studiati gli effetti reciproci tra la vegetazione, arborea ed arbustiva e il comportamento durante le fasi trasporto e deposizione delle colate detritiche, analizzando un evento reale innesatosi il 30 luglio 2012 su un piccolo bacino affluente in destra idrografica del Torrente Ansiei in provincia di Belluno. Successivamente, mediante l'impiego dei modelli numerici FLO-2D e RIVERFLO-2D si è tentato di simulare l'effetto "benefico" svolto dalla componente forestale nel limitare la pericolosità dei fenomeni quali *debris flow* nei confronti delle infrastrutture antropiche.

Innanzitutto è stato eseguito il completo rilievo del materiale detritico depositatosi in conoide pervenendo ad un volume totale di 14'535 m³, ed insistente su una superficie complessiva di circa 34'000 m² e successivamente, grazie all'analisi granulometrica eseguita all'interno del deposito, si è determinata la natura reologica della colata rientrante nel macrogruppo delle colate detritiche "dolomitiche" le quali, essendo costituite prevalentemente da materiale calcareo (come la Dolomia) assumono comportamenti variabili a seconda della loro concentrazione e se caratterizzate da granulometrie grossolane tendono ad assumere un comportamento di tipo macroviscoso con velocità relativamente basse (Moscariello et al. 2001).

Considerando gli effetti della colata detritica nei confronti della vegetazione in conoide è stato eseguito un rilievo floristico delle specie presenti misurando ad ogni individuo il diametro a 1.30 m, condizione sanitaria e spessore dei sedimenti a monte; tali operazioni sono state eseguite classificando la componente vegetale in "arborea" e "arbustiva" in modo da considerare la diversa natura e portamento delle specie e quindi rappresentare in modo più corretto i risultati.

Dai risultati emersi è evidente, sia per quanto concerne la componente arborea che arbustiva la stretta relazione proporzionale tra il diametro degli individui e lo spessore di deposito trattenuto a monte e la mortalità decrescente all'aumentare del diametro degli individui rilevati. In particolare, il primo aspetto conferma quanto trovato nel 2003 da Ishikawa et al. (2003) ovvero la maggior efficacia degli individui caratterizzati da diametri maggiori nella trattenuta nei confronti dei sedimenti trasportati nei debris flow, mentre il secondo conferma quanto stabilito già da Mizuyama et al. (1988) affermando che alberi con diametri maggiori hanno una minore probabilità di essere danneggiati in seguito all'impatto della colata perché la forza resistente è proporzionale al quadrato del diametro dell'albero.

Per quanto riguarda la determinazione del volume coinvolto nella colata e depositato in conoide, oltre alla stima "reale" condotta in campo, è stato quantificato anche mediante il cosiddetto metodo volumetrico partendo dall'idrogramma liquido ottenuto con il modello K.L.E.M, implementato nel software Adb-ToolBox in grado di generare, per il bacino e per l'evento pluviometrico in esame una portata liquida massima, transitante alla sezione di chiusura di circa $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$. Tale volume è stato calcolato mediante l'approccio volumetrico proposto da D'Agostino e Marchi (2004) i quali, modificando il metodo di Takahashi (1991), impongono la concentrazione dei sedimenti variabile da 0.200 (minimo) a 0.585 (massimo), per rappresentare più correttamente il naturale comportamento della colata. È stato così ottenuto un volume di materiale, depositatosi in seguito al *debris flow* analizzato di circa $16'000 \text{ m}^3$ il quale, sebbene sia caratterizzato da una portata totale molto elevata (circa $26 \text{ m}^3/\text{s}$) presenta un valore molto simile e in accordo con quanto rilevato in campo.

Mediante l'impiego dei modelli numerici FLO-2D e RIVERFLO-2D si è cercato poi di simulare l'importante effetto "benefico" svolto dalla componente forestale, la quale, attraverso un ruolo di difesa passiva, limita la pericolosità complessiva del fenomeno provocandone la riduzione della distanza di arresto, velocità ed energia nella fase di scorrimento e infine contenendo la possibile "area di inondazione" coinvolta nella deposizione del materiale.

Allo scopo di dimostrare ciò, per entrambi i modelli sono state eseguite tre diverse simulazioni: la prima "libera" dagli individui forestali per individuare il naturale deposito della colata; la seconda inserendo singolarmente gli individui forestali rilevati e la terza

raggruppando gli individui rilevati in gruppi omogenei in base alla densità. Tali modelli si sono dimostrati molto efficaci nella simulazione del comportamento e del volume depositato dalla colata ottenendo, in seguito all'inserimento della componente vegetale nel dominio di calcolo, risultati relativi a *run-out*, volume e area nettamente inferiori rispetto alle simulazioni "senza vegetazione". Nello specifico, il modello FLO-2D, grazie ad una maggiore precisione nella definizione dei parametri reologici in input quali sforzo tangenziale e viscosità, ha fornito valori molto accurati e quasi coincidenti con quanto rilevato nella realtà; meno performante è risultato il modello RIVERFLO-2D, essendo quest'ultimo caratterizzato da una maggiore semplicità nella definizione di tali variabili. Tale precisione è evidente anche nella valutazione dell'accuratezza che, per il software FLO-2D presenta valori di "irregolarità" mancante e negativa ($\beta+\gamma$) minori rispetto a quanto emerso per il modello RIVERFLO-2D.

Si può concludere dunque, in seguito ai risultati emersi in questo studio, il chiaro ruolo positivo svolto dalla vegetazione nei confronti dei processi di *debris flow* la quale, trattenendo il materiale inglobato e assorbendo direttamente l'energia del fenomeno, riduce sensibilmente l'impatto e la pericolosità generale dello stesso. Inoltre, previa una corretta calibratura dei modelli numerici di simulazione ed un rilievo vegetazionale in campo, è possibile definire le componenti necessarie alla prevenzione, gestione e previsione nelle aree maggiormente suscettibili al pericolo. È quindi possibile, nelle aree caratterizzate da un basso impatto antropico, realizzare gli interventi di protezione non solo ed esclusivamente con provvedimenti strutturali ma bensì seguendo una via cosiddetta *naturalistica*, ovvero scegliendo ed organizzando accuratamente la componente forestale in modo tale da consentirle di svolgere la funzione di protezione nel modo più efficiente possibile. Nei casi in cui questo non fosse possibile, causa per esempio della presenza di infrastrutture e centri antropici, si ritiene comunque opportuno associare la protezione garantita dalla componente vegetale ai classici interventi di trattenuta antropici, in modo così da limitarne l'impatto ambientale, la quantità di materiali impiegati e soprattutto l'importo nella realizzazione degli interventi.

BIBLIOGRAFIA

- Ancey, C. (2009). Debris-flows and related phenomena. In: Balmforth, N., and Provenzale, A. (eds). Geomorphological fluid mechanics. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Armanini, A. (1999). Dinamica delle Colate di Detriti. Proc. Conf. Previsione e Prevenzione di Movimenti Franosi Rapidi. GEAM. Trento June 17-18-19 1999. Trento. Pp. 207-221.
- Bagnold, R. A. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear. In Proceeding of the Royal Society London, Volume 225, pp. 49-63.
- Bardou F. (2002). Statistical properties of currents flowing.
- Benini G. (1990) - Sistemazioni idraulico - forestali. Editrice UTET, Torino.
- Berti, M., and Simoni, A. (2007). Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. Geomorphology, vol. 90, pp. 144-161.
- Bettella, F. (2014). Reologia e dinamica di propagazione delle colate detritiche: analisi e modellazione a diversa scala.
- Bischetti G.B., D'Agostino V., (2010). Sistemazioni Idraulico Forestali: Indirizzi per gli interventi; Quaderni della ricerca n.116, Regione Lombardia - Agricoltura, giugno 2010.
- Borga M. (2011) – Materiale didattico e appunti delle lezioni. Università degli Studi di Padova.
- Bovis, M.J., and Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. Earth Surf. Process. Landforms 24, pp. 1039-1054.
- Brang et al. (2001). Forest as protection from natural hazard.
- Brang et al. (2006). Management of protection forests in the European Alps: an overview.
- Bull, W. B. (1977), The alluvial fan environment. Prog. Phys. Geogr., 1, pp. 222-270.

- Bull, W. B. (1991), *Geomorphic Responses to Climatic Change*. Oxford Univ. Press, New York, pp. 326.
- Caine N. (1980) The rainfall intensity – duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler* 62A (1-2): 23-27.
- Cammeraat et al. (2005). Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain.
- Cannon, S.H. (1989). An evaluation of the travel distance potential of debris flows: Utah Geological and Mineral Survey Miscellaneous Publication 89 (2), p. 35.
- Cannon, S.H. (1989). An evaluation of the travel distance potential of debris flows: Utah Geological and Mineral Survey Miscellaneous Publication 89 (2), p. 35.
- Ceriani M., Lauzi S. & Padovan N. (1994) Rainfall thresholds triggering debris flows in the alpine area of Lombardia Region central alps. Italy. In: *Man and Mountain 94 First International Conference for the protection and development of the mountain environment*, Ponte di Legno, Italy, June 20-24, 1994:123-139.
- Costa, J.E. (1984). Physical geomorphology of debris flows.
- Crosta, G., Cucchiaro, S., and Frattini, P., (2003). Validation of semi-empirical relationships for the definition of debris-flow behavior in granular materials. In: Rickenmann, D., and Chen, C., (eds). *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Millpress, Rotterdam, pp. 821-832.
- D'Agostino V., Cesca M. (2009). Analisi reologica dei gruppi litologici del territorio provinciale per la simulazione dei debris flow mediante il modello FLO-2D.
- D'Agostino, V., Cesca, M., Marchi, L. (2010). Field and laboratory investigations of runout distances of debris flow in the dolomites (Eastern Italian Alps), *Geomorphology* 115, pp. 294-304;
- D'Agostino V. (2014) – Materiale didattico e appunti delle lezioni. Università degli Studi di Padova.
- D'Agostino V., Cesca M. and Marchi L., 2010. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps).

- D'Agostino V., Marchi, and L., Coali, R. (2004). Fenomeni di colata detritica alla testata di un bacino dolomitico. International Congress Interpraevent 2004, vol. 1, theme III, pp. 81-92.
- D'Agostino, V., and Marchi, L. (2003). Geomorphological estimation of debris-flow volumes in alpine basins. In: Rickenmann, D., and Chen, C.L. (eds). Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proceedings of the 3rd International DFHM Conference. Davos, Switzerland, September 10-12, 2003. Rotterdam, Millpress, pp. 1097-1106.
- D'Agostino, V., Cerato, M., and Coali, R., (1996). Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale. Proc. International Congress Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Austria, p. 377.
- Deganutti A. & Marchi L. (2000) Rainfall and debris-flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps). In G.F. Wieczorek & N.D. Naeser (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation; Proceedings of the 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan, August 16-18, 2000: 67-72.
- Del Favero R. (2004). I boschi delle regioni alpine italiane. Tipologia, funzionamento, selvicoltura. Casa editrice CLEUP.
- Ferro V. (2006) - La sistemazione dei bacini idrografici (848 p.). Seconda edizione. McGraw – Hill.
- Gonzalez-Ramirez, N. (2010). Simulating Flood Propagation in Urban Areas using a Two-Dimensional Numerical Model.
- Hashimoto and Park, 2003. Effect of tall vegetation on sediment transport by channel flows.
- Hashimoto H., Park K. (2003). Sediment transport and deposition in a steep open channel with multiple rows of cylinders.
- Hungr O., Morgan G.C., Kellerhals R. (1984) Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal, 21: 663-677.

- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., and Hutchinson, J.N. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII, pp. 221-238.
- Hungr, O., McDougall, S., Wise, M., and Cullen, M. (2008). Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief. *Geomorphology* 96, pp. 355-365.
- Hydronia, LLC. Pembroke Pines (2014). RIVERFLO-2D v4 model and documentation
- Ikeya, H., and Mizuyama, T. (1982). Flow and deposit properties of debris flow, Public Works Research Institute, Report pp. 157-2; pp. 88-153.
- Ishikawa Y. (2006). Suppression of debris movement by forests and damage to forests by debris deposition.
- Iverson, R. M., (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35, pp. 245-296.
- Kronfellner-Kraus, G. (1983). Torrent erosion and its control in Europe and some research activities in the field in Austria. *SABO - The Erosion-Control Engineering Society Japan*, 3, pp. 33-44.
- Kronfellner-Kraus, G. (1984). Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen [extreme sediment loads and erosion of torrents] *Proc. Int. Symp. Interpraevent, Villach, Austria, Bd. 2*, pp. 109-118.
- Lenzi M.A. (2013) – Materiale didattico e appunti delle lezioni. Università degli Studi di Padova.
- Major J. (1996). Depositional processes in large-scale debris-flow experiments
- Marchi L., D'Agostino v. (2004) Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface and Landformrs*, 29: 207-220.
- Marchi, L., and Tecca, P.R. (1995). Alluvial fans of Eastern Italian Alps: morphometry and depositional processes. *Geodinamica Acta*, 8(1), pp. 20-27.
- May, C.L., and Gresswell, R.E. (2004). Spatial and temporal patterns of debris flow deposition in the Oregon Coast Range. *U.S.A. Geomorphology* 57, pp. 135-149

- Melton, M.A. (1965). The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology*, 73, pp. 1-39.
- Meyer-Peter, E., and Muller, R. (1948). Formulas for bedload transport. *Proc. IAHR, 2nd Congress, Stockholm*, 39-64.
- Michelini T. (2011). Dinamica di deposizione di colate detritiche granulari: il caso dei torrenti Dosson, Cercen e Gabbio (Strembo, Trento). Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali. Relatore: Prof. Vincenzo D'Agostino.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per la Difesa del Suolo (2011). Utilizzo del software AdB – Toolbox (63 p).
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per la Difesa del Suolo (2011). Manuale d'uso del software applicativo AdB – Toolbox. Estensione ANALISI GEOMORFOLOGICHE.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per la Difesa del Suolo (2011). Manuale d'uso del software applicativo AdB – Toolbox. Estensione ANALISI IDROLOGICHE.
- Mishra S.K., Singh V.P. (2003) Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. *Water Science and Technology Library*, vol. 42, Eds. Kluwer Academic Publishers.
- Mizuyama T., Uehara S. (1983). Experimental study of the depositional process of debris flow. *Japanese Geomorphological Union* 4 (1), 49-63.
- Mizuyama, T. (1982). Analysis of sediment yield and transport data for erosion and control works. In: *Recent Development in the*
- Mizuyama, T., Kobashi, S., and Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. *Interpraevent 1992, Bern* 4, pp. 99-108.
- Moscariello, A., Marchi, L., Maraga, F., and Mortara, G., (2002). Alluvial fans in the Italian Alps: sedimentary facies and processes. In: Martini, P., Baker, V.R., and Garzon, G. (eds.). *Flood & Megaflood Processes and Deposits-Recent and Ancient Examples*. Blackwell Science, Oxford (UK), pp. 141-166.
- O' Brien, J.S. (2009). FLO-2D user manual. Version January 2006 Nutrioso, Arizona.

- O' Brien, J.S., and Julien, P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 114(8), pp. 877-887.
- O'Brien J. S., Julien P. J., Fullerton W. T. (1993). Two-dimensional water flow and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119, 244 – 261.
- Ou G. and Mizuyama T. (1994) Predicting the average sediment concentration of debris flows. *Journal of Japanese Erosion Control Engineering Society* 47(4), 9-13 (in Japanese)
- Panizza M. (2007) - *Geomorfologia, nuova edizione* (346 p.). Pitagora Editrice Bologna.
- Pierson, T. C. (1980). Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand, *Earth Surf. Processes*, 5, pp. 227-247.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte (2006). *Disturbi naturali e stabilità nelle Alpi occidentali*.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte (2006). *Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e Valle d'Aosta*.
- Rickenmann D. (2005). *Run-out prediction methods*.
- Romanel L. (2012). *Analisi geo-idrologica del bacino del Rudavoi e delle condizioni di innesco delle colate detritiche*. Tesi di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio. Relatore: Prof. Carlo Gregoretti.
- Scheidl C., Rickenmann D. (2010). Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 157–173.
- Schoklitsch, A. (1962). *Handbuch des Wasserbaues*, 3rd edn. Springer, Vienna, pp. 1-475.
- Sferlazza E. (2011) - *Guida all'uso dei dati Geografici con AdB – Toolbox* (70 p).
- Soil Survey Division Staff (1993) *Soil survey Manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture (NRCS) Handbook n. 18.
- Spreafico M., Lehmann C.H., Naef O. (1999) *Recommandations concernant l'estimation de la charge sédimentaire dans les torrents* (in French). Groupe de travail

pour l'hydrologie opérationnelle (GHO), Berne, communication n. 4a, 48 pp plus annexes.

- Takahashi T. (1978) Mechanical characteristics of debris flow *Journal of Hydraulic Engineering*, 104, 8, 1153-1169.
- Takahashi T. (1991). Debris Flow Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Published for the International Association for Hydraulic Research by A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/1991.
- Takahashi T. (2007) Debris Flows: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor and Francis/Balkema, Leiden.
- Takahashi, T. (1983). Debris flow and debris flow deposition. In: Shahinpoor, M. (ed). *Advances in the mechanics and the flow of granular materials Vol. 2*. Trans Tech Publications, West Germany.
- Takahashi, T. (1997). Dynamics of the inertial and viscous debris flows. In: Armanini, A., and Michiue, M. (eds.). *Recent developments on debris flows, lecture notes in earth sciences*. Springer, Berlin, pp. 117-143.
- Takahashi, T. (2000). Initiation and flow of various types of debris-flow. In: *Proc. 2nd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Taipei, Taiwan, edited by: Wieczorek, G. F. and Naeser, N. D., Balkema, Rotterdam, pp. 15-25.
- Tognacca C., Bezzola G.R. & Minor H.E. (2000) Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. In: *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* Wieczorek & Naeser Eds., Balkema, 89-97
- VanDine, D. F. (1985). Debris flows and debris torrents in the southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 22, 44-67.
- VanDine, D.F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. Ministry of Forests Research Program, Working Paper 22/1996. Government of the Province of British Columbia, Vancouver.
- Vandre, B.C., (1985). Rudd Creek debris flow. In: Bowels, D.S. (ed.). *Delineation of landslide, flash flood and debris flow hazards*. Utah Water Research Laboratory, Logan, Utah, pp. 117-131.